

AALTO-YLIOPISTO
SÄHKÖTEKNIIKAN KORKEAKOULU

Elektroniikan Laitos

Valaistusyksikkö

Matti Sinisalo

Toimistovalaituksen ohjausjärjestelmät ja elinkaarikustannustarkastelu

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 8.3.2011

Työn valvoja Professori Liisa Halonen

Työn ohjaaja Jorma Kuusela

Tekijä: Matti Sinisalo

Työn nimi: Toimistovalaisuksen ohjausjärjestelmät ja elinkaarikustannustarkastelu

Päivämäärä: 8.3.2011

Sivumäärä: 51

Elektroniikan laitos, Valaistusyksikkö

Professori: Valaistustekniikka ja sähköinen talotekniikka

Koodi: S-118

Työn valvoja: Professori Liisa Halonen

Työn ohjaaja: Diplomi-insinööri Jorma Kuusela

Tiivistelmäteksti:

Rakennusten energiatehokkuuteen kiinnitetään entistä enemmän huomiota. Toimistotaloissa valaistus on yksi merkittävä sähköenergiankuluttaja. Eri arviointimenetelmillä voidaan vertailla eri valaistusratkaisujen energiatehokkuutta ennen niiden asentamista. Energia-arviointi ei ole kuitenkaan riittävää, vaan on tarkasteltava myös kustannuksia, joihin sisältyvät investointi-, käyttö- ja huoltokustannukset. Toimistotalojen tyypillisten tilojen (toimistohuone, avotoimisto ja käytävä) valaistushäviönsäästöjä selvitetään ja niiden vaikutusta valaistuksen energiankulutukseen ja elinkaarikustannuksiin. Valaistushäviönsäästämistä esitellään muutamia esimerkkejä. Valaistuksen laadullisia tekijöitä ei tarkastella vaan keskitytään valaistusvoimakkuuteen ja sen tasaisuuteen. Elinkaarikustannukset arvioidaan nettonykyarvomenetelmällä 20 vuoden tarkastelujaksolla.

Hyvähyötysuhteisen loistelamppuvalaisimen, jossa on pitkäikäiset lamput, käyttäminen yhdessä paikallistetun yleisvalaistustavan kanssa on varsin energiatehokas valaistusratkaisu. Valaistuksen energiankulutusta voidaan nykyisellä teknologiallakin vielä edelleen selvästi pienentää valaistusvoimakkuudesta ja sen tasaisuudesta tinkimättä. Toimistohuoneessa ja avotoimistossa ohjauksilla pystyi saavuttamaan suuremman energiansäästön kuin valaistustapaa ja -teknologiaa vaihtamalla. Käytävässä investointi valaisimiin aiheutti suuremman energiansäästön kuin investointi ohjausjärjestelmään. Energian kulutuksen pienentyminen ei näkynyt voimakkaasti elinkaarikustannusten nettonykyarvoissa. Eniten elinkaarikustannuksiin vaikutti alkuinvestointiin kulunut pääoma. Vain toimistohuoneessa investointi perusratkaisua kalliimpiin vaihtoehtoihin näkyi pienempinä elinkaarikustannuksina, ja silloinkin kalliimmat investoinnit alkoivat tuottaa voittoa verrattuna perusratkaisuun noin 15 vuoden kuluttua. Kustannussäästöjä, jotka motivoisivat investoimaan sinänsä jo varsin energiatehokasta ratkaisua vielä tehokkaampiin vaihtoehtoihin, ei havaittu. Tilanne muuttuu jatkuvasti ja erityisesti LED-teknologian nopea kehittyminen sekä toisaalta hintojen aleneminen vaikuttanee ratkaisevasti tulevaisuuden valaistusratkaisuihin.

Avainsanat: ohjaus, elinkaari, kustannus, toimistovalaisus

Author:

Name of the thesis: Lighting Control Systems and Life-cycle Cost assessment of Office Lighting System

Date: 3.8.2011

Number of pages: 51

Department of Electronics, Lighting unit

Professorship: Illumination engineering and electrical building services Code: S-118

Supervisor: Professor Liisa Halonen

Instructor: MSc Jorma Kuusela

Abstract text:

Energy efficiency in buildings gains more and more attention. In office buildings, lighting is a major consumer of electricity. Different evaluation methods can be used to compare the energy-efficiency of different lighting solutions, before installing them. Energy assessment is not enough, but attention must be given to the costs including investment, operating and maintenance. Lighting control solutions for typical office space (cellular office, open-plan office, corridor) are examined and their effect on energy consumption and life-cycle costs are studied. A few examples of lighting control systems are given. The qualitative factors of lighting are not considered but illuminance and its uniformity are taken into account. The life-cycle costs for 20 years period are estimated using net present value method.

A luminaire of good light output ratio with long-life fluorescent lamps combined with localised general illumination method is very energy-efficient lighting solution. Lighting energy consumption can be significantly reduced using available technology without compromising required illuminance and its uniformity. In cellular office and open-plan office, more energy savings were achieved with control systems than with changed illumination method and lighting technology. In corridor, investment in luminaire technology caused more energy savings than investment in controls. Reduced energy consumption did not show significantly in life-cycle costs. The most significant part of life-cycle costs was initial investment. Only in cellular office the investment in more expensive solutions showed lower life-cycle costs, but they began to generate profit only after 15 years of operation. Cost saving that motivate to invest in more effective lighting solution were not found. The situation is constantly changing and in particular the rapid technological development and price reduction of LED products, will contribute remarkably to the future lighting solutions.

Keywords: control, life-cycle, cost, office lighting

Alkulause

Haluan kiittää työpaikkaani Insinööritoimisto E-Plan Oy:tä saamastani tuesta diplomityöni tekemisessä. Kiitokset diplomi-insinööri Jorma Kuuselalle, insinööri Kalle Pitkälälle ja insinööri Ari Nukariselle saamistani neuvoista erityisesti kustannuslaskentaan.

Kiitos tekniikan lisensiaatti Mikko Hyväriselle rakentavasta palautteesta diplomityöhöni ja opastuksesta diplomityöhön liittyvissä käytännön asioissa.

Kiitos diplomityöni valvojalle professori Liisa Haloselle antamasi palautteesta ja rohkaisusta ja erityisesti loppuvaiheessa asetetusta haasteellisesta valmistumisaikataulusta, mikä varmasti edesauttoi valmistumistani kevään 2011 aikana.

Espoossa maaliskuun 8. päivä 2011



Matti Sinisalo

Sisällysluettelo

Alkulause	4
Sisällysluettelo	5
Symboli- ja lyhenneluettelo	7
1 Johdanto	9
1.1 Tausta	9
1.2 Tavoitteet ja rakenne	9
2 Valaistusjärjestelmät toimistorakennuksissa	11
2.1 Toimistotyypit ja valaistusratkaisut	11
2.2 Energiatehokkuus	13
3 Valaistuksen ohjausjärjestelmät	15
3.1 Johdanto	15
3.2 Järjestelmätyypit	16
3.2.1 Standardin IEC 60929 mukaiset ohjaustavat	16
3.2.2 DSI	18
3.2.3 DMX	19
3.2.4 Suorapainikeohjaus	19
3.2.5 Käytävätoimisto	20
3.2.6 Reititinjärjestelmät	21
3.3 Valaistuksen ohjausstrategiat	24
3.3.1 Ohjaus päälle ja pois	24
3.3.2 Vakiovalo-ohjaus	24
3.3.3 Läsäolo-ohjaus	25
3.3.4 Päivänvalo-ohjaus	25
3.3.5 Yhdistetty ohjaus	27
3.4 Ohjauksen vaikutus energiatehokkuuteen	27
3.5 Valaistusohjausjärjestelmän suunnittelu	30

4	Toimistotalon tyyppitilojen esimerkkiratkaisut.....	32
4.1	Yleistä.....	32
4.2	Toimistohuone.....	32
4.3	Avotoimisto.....	34
4.4	Käytävä.....	36
5	Energiankulutus ja elinkaarikustannukset.....	38
5.1	Valaistusjärjestelmän kustannukset.....	38
5.1.1	Kiinteät kustannukset.....	38
5.1.2	Energiakustannukset.....	39
5.1.3	Lamppu- ja liitännälaittekustannukset.....	40
5.1.4	Huoltokustannukset.....	40
5.1.5	Laskentakorko ja pitoaika.....	41
5.2	Tyyppitilojen esimerkkiratkaisujen kustannukset.....	41
5.3	Toimistohuone.....	43
5.3.1	Energiankulutus.....	43
5.3.2	Elinkaarikustannukset.....	43
5.4	Avotoimisto.....	45
5.4.1	Energiankulutus.....	45
5.4.2	Elinkaarikustannukset.....	45
5.5	Käytävä.....	46
5.5.1	Energiankulutus.....	46
5.5.2	Elinkaarikustannukset.....	46
6	Johtopäätökset.....	48
	Lähteet.....	50

Symboli- ja lyhenneluettelo

A	valaistus pinta-ala (m ²) tai ampeeri
a	vuosi
°C	celsiusaste
DALI	Digital Addressable Lighting Interface
DMX	Digital MultipleX
DSI	Digital Serial Interface
E _m	valaistusvoimakkuuden huoltoarvo (lx)
E _{min}	minimivalaistusvoimakkuus (lx)
E _{min} /E _m	valaistusvoimakkuuden yleistasaisuus
F _C	ylimitoituksen kompensointikerroin
F _D	päivänvalon riippuvuuskerroin
F _O	läsnäolokerroin
H	hankintameno (€)
h _a	puhdistusväline- ja ainekustannus (€/valaisin)
h _{ch}	liitälaitteen hankintahinta (€)
h _{cv}	liitälaitteen vaihtotyön hinta (€)
h _h	puhdistuksen työkustannus (€/lamppu)
h _{lh}	lampun hankintahinta (€)
h _{lv}	lampun vaihtotyön hinta (€)
h _o	lampun ongelmajättemaksu (€)
h _p	puhdistustyön hinta (€/h)
i	korkokanta
IEC	International Electrotechnical Commission
IESNA	Illuminating Engineering Society in North America
JAMAK	parisuojattu instrumentointikaapeli
J-2YY	kerroskaapeloinnissa käytetty parikaapeli
EIA	Electronic Industries Association
EMC	Electro-Magnetic Compatibility
EMV	Energiamarkkinavirasto
K	kustannusten nykyarvo (€) tai kelvin
K _h	puhdistuskustannus (€/vuosi)
K _l	lamppu- ja liitälaittekustannus (€/vuosi)
LED	loistediodi
LEED	Leadership in Energy and Environmental Design
LENI	Lighting Energy Numeric Indicator
lm	luumen
lx	luksi

m	metri
Mbit/s	megabittiä sekunnissa
MMJ	muovivaippainen asennuskaapeli
N	pitoaika
NOMAK	instrumentointikaapeli
n_l	lamppujen lukumäärä valaisimessa
n_v	valaisimien lukumäärä
P_{em}	huoneessa tai alueella olevan turvavalaistuksen varausteho (W)
P_n	valaistuksen asennettu kokonaisteho huoneessa tai tietyllä alueella (W)
P_{pc}	huoneessa tai alueella olevien valaistuksen ohjausjärjestelmien lepokulutus (W)
PWM	pulssinleveysmodulaatio
q_n	juokseva kustannus vuonna n
R_a	värintoistoindeksi
SELV	Safety Extra Low Voltage
SFS	Suomen Standardisoimisliitto SFS ry
SVS	Suomen valoteknillinen seura ry
t_c	liitäntälaitteen elinikä (h)
t_D	käyttö valoisaan aikaan (h)
t_{em}	turvavalaistuksen varausaika (h)
t_h	puhdistuksen aikaväli (a)
t_l	lampun elinikä (h)
t_N	käyttö pimeään aikaan (h)
t_p	puhdistustyöhön kuluva aika (h/valaisin)
t_y	standardivuosi, 8760 h
T16	loistelamppu, jonka halkaisija on 16 mm
T26	loistelamppu, jonka halkaisija on 26 mm
U	pääjännite
U_0	vaihejännite
UGR	Unified Glare Rating
V	voltti
W	valaistuksen vuotuinen kokonaisenergia (kWh) tai watti
$W_{valaistus}$	valaistuksen käyttöön kuluva energia (kWh)
$W_{lepokulutus}$	vuotuinen turvavalaistuksen akkujen varaamiseen käytettävän energian ja ohjausjärjestelmien valmiustilojen lepokulutukseen kuluvan energian summa (kWh)
ZVEI	Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V.

1 Johdanto

1.1 Tausta

Rakennusten energiatehokkuuteen on alettu kiinnittää entistä enemmän huomiota. Syyinä tähän ovat etenkin energiakustannusten kasvu, lainsäädännössä ja standardeissa tapahtuneet muutokset ja halukkuus pienentää kasvihuonekaasupäästöjä. Valaistus on merkittävä energian kuluttaja erityisesti toimistorakennuksissa. Nykyisessä toimistorakennuskannassa on edelleen paljon käytössä jo vanhentunutta tekniikka, eikä uusissaakaan rakennuksissa hyödynnetä täysimääräisesti nykyaikaisella teknologialla saavutettavia energiansäästömahdollisuuksia.

Erilaisilla energian käytön arviointimenetelmillä voidaan vertailla eri valaistusratkaisujen energiatehokkuutta etukäteen ennen niiden asentamista. Eräs tällainen menetelmä on SFS-EN 15193 (2009) mukainen LENI-laskenta. Menetelmä tarjoaa vakioituneen keinon selvittää eri rakennustyyppien valaistusenergian kulutuksen huomioiden myös ohjausjärjestelmät.

Pelkkä energiankulutuksen arviointi ei ole kuitenkaan riittävää, vaan mukaan tarkasteluun on otettavat valaistusjärjestelmän kustannukset. Kustannuksiin tulisi sisällyttää alkuinvestoinnin lisäksi käytöstä ja huollosta aiheutuvat kustannukset. Kustannustarkastelu yhdessä valaistusteknillisen suunnittelun kanssa mahdollistaa valaistusvaihtoehtojen teknillis-taloudellisen vertailun käyttökelpoisimman vaihtoehdon löytämiseksi.

1.2 Tavoitteet ja rakenne

Tämän diplomityön tavoitteena on selvittää toimistotalojen tyypillisten tilojen valaistusohjausratkaisuja ja niiden vaikutusta valaistuksen energiankulutukseen ja elinkaarikustannuksiin. Valaistusohjausjärjestelmistä esitellään muutamia esimerkkejä ja tuodaan esiin niiden vahvuuksia ja soveltuvuutta toimistovalaitukseen.

Toimistotalojen tyypillisistä tiloista tarkastellaan toimistohuonetta, avotoimistoa ja käytävää. Kullekin tyyppitilalle suunnitellaan neljä erilaista valaistusratkaisua, joista kahdessa käytettiin automaattista valaistusohjausta ja kahdessa manuaalista valaistuksen sammuttamista ja sytyttämistä. Toimistohuoneessa ja avotoimistossa myös vertaillaan kahden erilaisen valaistustavan vaikutusta energiankulutukseen ja elinkaarikustannuksiin.

Koska eri valaistusvaihtoehtojen välisten vertailujen on perustuttava samoihin kriteereihin, jokaisesta tyyppitilasta ja jokaisesta valaistusvaihtoehdosta tehtiin valaistuslaskelmat ja varmistetaan vaihtoehtojen välinen vertailukelpoisuus. Valaistuksen laadullisia tekijöitä ei tarkastella vaan keskitytään valaistusvoimakkuuteen ja sen tasaisuuteen käyttötasolla huomioiden työalueelle ja sitä ympäröivälle alueelle asetetut vaatimukset. Häikäisyä ei arvioida, koska UGR-menetelmän soveltuvuus tiloissa, joissa käytetään paikallisvalaistusta ja epäsuoraa valaistusta on kyseenalainen. Valaistuslaskelmat tehdään DIALux 4.9.0 ohjelmistolla (DIAL GmbH, Saksa).

Energian kulutusta arvioidaan LENI-luvun avulla. Energiankulutuksen arviointia varten kullekin tilalle laaditaan sanallinen toimintaselostus valaistuksen toiminnasta. LENI-lukujen laskenta suoritetaan myös DIALux 4.9.0 ohjelmistolla.

Elinkaarikustannukset arvioidaan nettonykyarvomenetelmällä 20 vuoden tarkastelujaksolla huomioiden investointi-, huolto-, lamppu- ja liitäntälaitte- ja energiakustannukset. Laskelmat tehdään Microsoft Excel 2008 -ohjelmistolla (Microsoft Corporation, USA) käyttäen pohjana Aalto yliopiston valaistusyksikössä luotua valaistusasennusten vertailupohjaa (kurssi S-118.3260 Valaistussuunnittelu keväällä 2010). Pohjaa kuitenkin muunnellaan soveltumaan paremmin tässä diplomityössä käytettyihin menetelmiin ja asetettuihin tavoitteisiin.

Luvussa 2 tutustutaan erilaisiin toimistotyyppeihin ja niissä käytettyihin valaistusratkaisuihin sekä tutustutaan energiatehokkuuteen käsitteenä. Luvussa 3 käsitellään valaistusohjausjärjestelmiä, niiden suunnittelua ja niihin liittyviä käsitteitä.

Luvussa 4 esitellään toimistotaloon tehdyt tyyppitilat, niiden valaistusteknilliset suunnitelmatulokset ja kunkin tilan valaistuksen toiminta. Luvussa 5 tutustutaan valaistusjärjestelmien kustannusrakenteeseen ja esitetään kunkin tyyppitilan energiankulutuksen arvioinnin tulokset ja elinkaarikustannukset sekä kustannuslaskentaan liittyvät oletukset.

2 Valaistusjärjestelmät toimistorakennuksissa

2.1 Toimistotyypit ja valaistusratkaisut

Toimistotiloissa tapahtuva työ on vaihtelevaa. Toimistotyö koostuu erilaisista viestintä-tilanteista, joita voivat olla esimerkiksi puhelinkeskustelut, tapaamiset kasvokkain tai viestintä tietokoneen välityksellä. Viestintä voi olla kirjallista tai muuten näkemiseen perustuvaa. Toimistovalaisuksen avulla nämä tehtävät pitäisi pystyä tekemään tehokkaasti. (IESNA 2000)

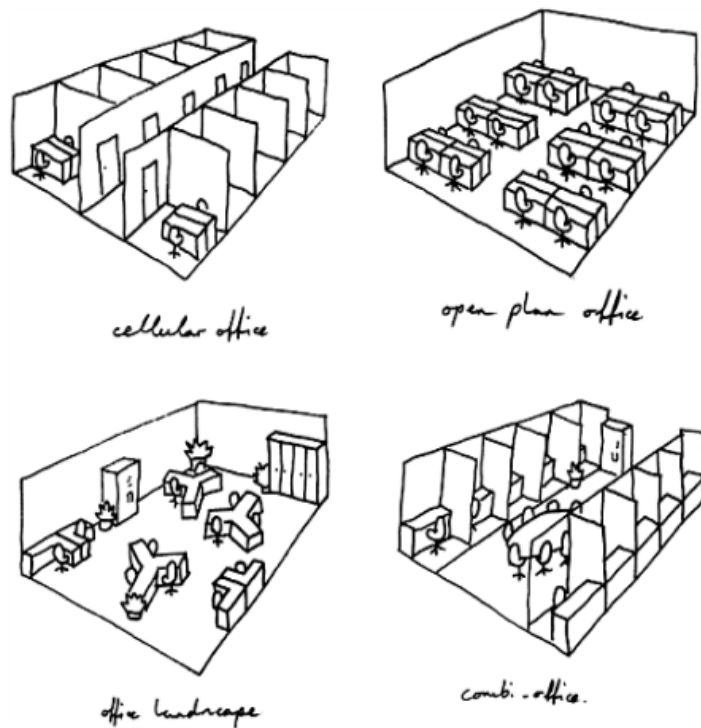
Työympäristön toimistoissa pitäisi olla innostava ja viihtyisä ja energiaa tulisi käyttää tehokkaasti. Valaistus vaikuttaa tilan ulkonäköön ja käyttäjiin, ja siten mielialaan ja tuottavuuteen. Valaistuksella on kuitenkin pystyttävä luomaan sopivat näkemisolosuhteet, jotta näkemistehtävät voidaan suorittaa. Vaikka on tärkeää tarkastella sekä valaistusta ympäristöä että näkötehtävän vaatimaa valaistusta erikseen, niiden täytyy toimia myös kokonaisuutena. Samaa valaistusjärjestelmää voidaan käyttää sekä ympäristön valaisuun että työtehtävävalaistukseen, mutta tarvittaessa työtehtävän vaatiessa näköolosuhteita voidaan parantaa lisävalaisimilla. (IESNA 2000)

Yleisenä tavoitteena on luoda tehokkaita ja toiminnallisia toimistotiloja. Tilojen täytyisi tukea käyttäjien tarpeita, tilojen pitäisi olla muunneltavia ja niiden pitäisi tukea työntekijöiden välistä viestintää. Tilat eivät myöskään saisi maksaa liikaa. Johtuen muun muassa kulttuurin, lainsäädännön ja määräysten, työntekijöiden aseman ja markkinatilanteen erilaisuudesta käytetään eri maissa toisistaan poikkeavia ratkaisuja tehokkaan ja toiminnallisen toimistotilan luomiseksi. (van Meel 2001)

Vastaavat tavoitteet ohjaavat toimistovalaisusjärjestelmän suunnittelua. Valaistusstandardeissa ei anneta ohjeita tai määräyksiä valaistustavasta vaan valaistusteknisistä vaatimuksista lähtien näkömukavuuden ja näkötehokkuuden tarpeista (SFS-EN 12464-1 2003). Valaistusympäristöllä tarkoitetaan valaistuksen psykologisia ja fysiologisia vaikutuksia (SFS-EN 2009). Näkötehokkuudella tarkoitetaan näköjärjestelmän kykyä suorittaa näkötehtävä mitattuna esimerkiksi nopeutena ja tarkkuutena (SFS-EN 12665 2009). Näkömukavuudella tarkoitetaan henkilön subjektiivista näkemystä valaistus ympäristön aiheuttamasta mukavuudesta (SFS-EN 12665 2009).

Toimistotilat voidaan jakaa neljään perustyyppiin (Kuva 1): erillisiin toimistohuoneisiin (cellular office), avotoimistoon (open plan office), maisematoimistoon (office landscape) ja yhdistelmätoimistoon (combi office). Kullakin toimistotyypillä on omat ominaispiirteensä, hyvät puolet ja heikkoudet.

Erilliset toimistohuoneet ovat yleensä noin 4–5,5 m syviä ja 2,5–4,5 leveitä. Huonekorkeus voi olla 4 m saakka. Huoneisiin kuljetaan käytävän kautta sisään. Erillisissä toimistohuoneissa voi työskennellä 1–6 henkilöä per huone. Sähkö- ja tietoliikennekaapelointi on joko johtokanavissa ikkunaseinällä, lattiarasiassa tai katossa. Päivänvaloa on hyvin hyödynnettävissä. (Lorentz 2002)



Kuva 1. Erilaisia toimistotyyppejä (van Meel 2001).

Avotoimistojen koko on luokkaa 400–1200 m². Huoneessa voi olla 25–100 työntekijää. Työpisteille ei kuljeta käytävän kautta. Sähkö- ja tietoliikennekaapelointi on joko alakatossa tai lattiasa. Ikkunaseinillä on tarjolla päivänvaloa, mutta sisäalueilla on jatkuvasti käytettävä keinovalaistusta. Maisematoimistot ovat avotoimistojen kaltaisia, mutta niissä työpisteiden sijoittelu on täysin vapaata ja seassa voi olla neuvottelu- ja taukotiloja. (Lorentz 2002, van Meel 2001)

Yhdistelmätoimistossa toimistohuoneet ympäröivät yhteistä aluetta, jossa voi olla taukotiloja, neuvottelutiloja ja työpisteitä. Toimistohuoneisiin kuljetaan yhteisen alueen kautta. Toimistohuoneissa päivänvaloa on hyvin hyödynnettävissä, mutta yhteisalueella tarvitaan jatkuvasti keinovaloa. (Lorentz 2002). Yhdistelmätoimistot ovat tyypillisiä erityisesti Ruotsissa ja muissa Pohjois-Euroopan maissa mukaan lukien Suomi (Van Meel 2001).

Toimistoihin asennettavat valaistusjärjestelmät voidaan erottaa SFS-EN 12665 (2009) mukaisesti neljään ryhmään:

- Yleisvalaistukseen,
- paikallistettuun yleisvalaistukseen,
- paikallisvalaistukseen ja
- turvavalaisukseen.

Yleisvalaistuksella luodaan tasainen valaistus tilaan ilman, että huomioidaan paikallisia erityisvaatimuksia. Yleisvalaistus saadaan aikaan useilla valaisimilla, jotka sijoitetaan melko lailla tasajakoisesti koko kattopinnalle. Tuloksena saadaan koko huoneeseen samanlainen, melko tasainen valaistusvoimakkuus. Paikallistettu yleisvalaistus luo tasaisen valaistuksen tilaan ja lisäksi suurempia valaistusvoimakkuuksia tiettyihin paikkoi-

hin, esimerkiksi työpisteisiin. Yleisvalaistukseen verrattuna paikallistettu yleisvalaistus voi olla taloudellisempi lopputulos, koska valaisimet keskitetään työskentelyalueiden kohdalle (SVS 1986). Paikallisvalaistus on yleisvalaistuksen tai paikallistetun yleisvalaistuksen lisänä ja sitä on voitava ohjata erikseen (SFS-EN 12665 2009). Paikallisvalaistusta suositellaan, kun suuri valaistusvoimakkuus tarvitaan vain rajoitetulla alueella, kun yleisvalaistus ei ulotu kaikkiin paikkoihin esteiden vuoksi tai henkilön näkökyky on heikentynyt (SVS 1986). Turvavalaitusta tarvitaan kiinteistöissä silloin, kun normaali valaistus vikaantuu (SFS-EN 1838 1999). Turvavalaitusta ei käsitellä tässä diplomityössä.

Toimistovalaituksessa voidaan erottaa valon pääasiallisen suuntauksen perusteella neljä perusmallia:

- Suora valaistus,
- epäsuora valaistus,
- suoran ja epäsuoran valaistuksen yhdistelmä ja
- hajavalaitus.

Suoralla valaituksella tarkoitetaan sellaista valaitusasennusta, jossa valaisimien valovirrasta 90–100% suuntautuu suoraan työskentelytasolle. Epäsuoralla valaituksella tarkoitetaan sellaista valaitusasennusta, jossa valaisimien valovirrasta suoraan työskentelytasolle suuntautuvan valovirran osuus on 0–10%. Suoran ja epäsuoran valaituksen yhdistelmät voidaan edelleen jakaa kolmeen alaryhmään työskentelytasolle suoraan tulevan valovirran osuuden perusteella. Puolisuoralla valaituksella suoran valovirran osuus on 60–90%, suora-epäsuoralla valaituksella 40–60% ja puoliepäsuoralla 10–40%. Hajavalaituksella tarkoitetaan sellaista valaitustapaa, jossa työtasolle suuntautuva valo ei ole hallitsevasti peräisin yhdestä valonlähteestä (SFS-EN 12665 2009).

2.2 Energiatohokkuus

Energiatohokkuudella ei ole kovin vakiintunutta merkitystä yhteiskunnallisessa keskustelussa (Vehmas 2005, EIA 2005). Vehmas (2005) määritteli energiatohokkuuden tuotantoon tai tulokseen suhteessa käytettyyn energiaan. Intensiteetillä hän tarkoitti energian käytön suhdetta tuotantoon tai tulokseen. Ero energiatohokkuuden ja intensiteetin välillä ei ole selvä. Useimmiten intensiteetti mielletään energiatohokkuudeksi (EIA 2005). Ahtilan (2009) mukaan energiatohokkuuden lisääminen tarkoittaa suoritteiden tuottamiseksi tarvittavan energian vähentämistä energian tuotannossa, siirrossa ja käytössä. Hänen mukaansa energiatohokkuus energiankäytössä tarkoittaa energian ominaiskulutuksen alentamista muiden tekijöiden pysyessä vakiona. Energiatohokkuus voi tarkoittaa myös suurempaa tuotantoa energiankulutuksen pysyessä vakiona. Työ- ja elinkeinoministeriön (2009) mukaan energian ominaiskulutus tarkoittaa suhteellista energiankulutusta tuoteyksikköä tai palvelua kohden. Se voidaan laskea esimerkiksi tuotetonta (MWh/tuotetonna) tai rakennuskuutiota (kWh/m³) kohti. Tavoitteena energiatohokkuuden parantamisessa on kasvihuonekaasupäästöjen vähentäminen. LENI-luvun yksikkö on kWh/m².

Energiatohokkuutta ei voida erottaa täysin energiansäästöstä, jolla yleensä tarkoitetaan energiankäytön absoluuttista pienentämistä. Energiatohokkuus sen sijaan voi kasvaa energiankäytön kanssa samanaikaisesti (Gynther et al. 2008).

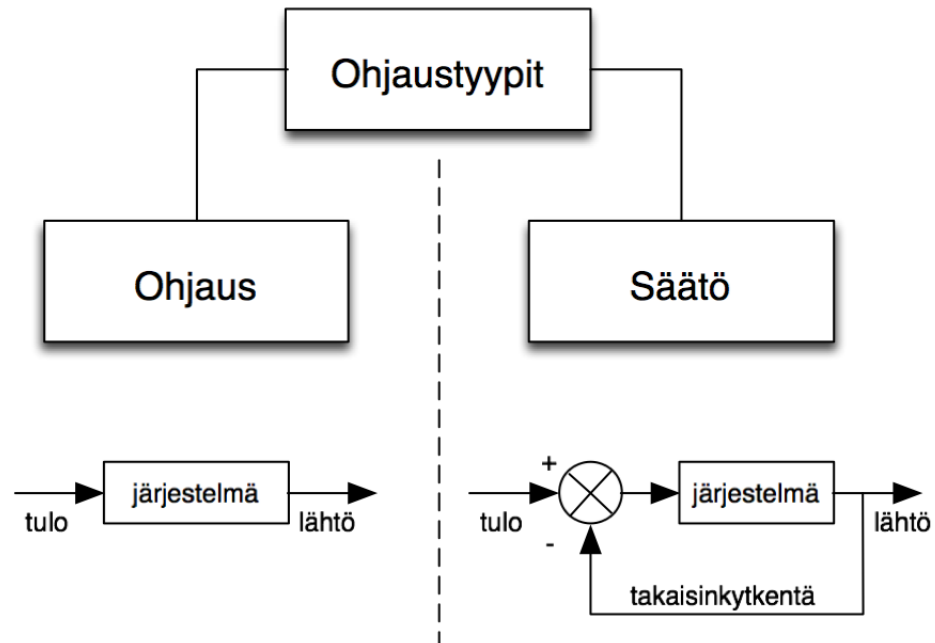
Energiatehokkuuden kohdalla ei voida sivuuttaa täysin kustannuksia. Englannin sanakirjan mukaan toiminta on tehokasta, kun toimitaan hyvin ja perusteellisesti ilman, että hukataan aikaa, rahaa tai energiaa (Hornby 2000, s. 402). Energiatehokkuudesta puhuttaessa pääpaino kohdistuu luonnollisesti energiankäyttöön. Kuitenkin rajallisten resursien vallitessa suurimmat energiansäästöt voidaan saada aikaan sijoittamalla investointivarat ratkaisuihin, joilla energiankulutus pienenee eniten per sijoitettu rahamäärä.

Tässä diplomityössä *energiatehokkuudella* tarkoitetaan joko energiankulutuksen pienentämistä säilyttäen vaadittu laatutaso tai laatutason parantamista pitäen energiankulutus ennallaan.

3 Valaistuksen ohjausjärjestelmät

3.1 Johdanto

Sähkötekniillisen sanaston mukaan ohjaus on tarkoituksellinen toimenpide, jolla voidaan toteuttaa määritellyt tavoitteet (SFS-IEC 60050-351). Ohjaustyypit voidaan jakaa kahteen ryhmään, varsinaiseen ohjaukseen ja säätöön (Kuva 2).



Kuva 2. Ohjaus ja säätö.

Varsinaisella ohjauksella tarkoitetaan järjestelmää, jossa yksi tai useampi tulomuuttuja vaikuttaa lähtösuureisiin järjestelmän toimintalakien mukaisesti. Säädössä lähtömuuttujaa mitataan ja verrataan tulomuuttujaan ja muodostetaan erosuure, johon järjestelmä reagoi (Bolton 2008).

Valaistuksen kytkeminen päälle etäohjauksena on tyypillinen esimerkki varsinaisesta ohjauksesta, sillä kytkentä tapahtuu riippumatta siitä onko valaistavassa tilassa riittävästi luonnonvaloa tai ei. Säätöä havainnollistaa tilanteella, jossa valaisimen lamppujen valovirtaa säädellään asetusarvon ja valoisuutta mittaavan anturin ohjeen perusteella. Käytännössä ohjauksen ja säädön tiukka erottelu voi tuntua keinotekoiselta.

Aikaisemmin ohjauksella on tarkoitettu pääasiassa valaistuksen ohjaamista joko päälle tai pois, tai ohjauksia on käytetty esimerkiksi näyttämö- ja teatterivalaistuksessa tai neuvotteluhuoneissa. Nykyisin ohjaukset ovat tärkeä osa valaistussuunnittelussa ja energiansäästöissä. Ohjauksen avulla voidaan säätää valaistustasoa. Ohjauksia voidaan tehdä energiataloudellisista tai esteettisistä syistä. Energiataloudellisilla ohjauksilla voidaan saada aikaan energia- ja kustannussäästöjä pienentämällä tehoa tai käyttöaikaa tai rajoittamalla huipputehoa. Valaistuksen esteettisellä ohjauksella voidaan muuttaa tilojen toiminnallisuutta ja tunnelmaa tai muuttaa valaistuksen määrää, värilämpötilaa tai väriä näkötehtävien vaatimusten mukaiseksi. Energiataloudelliset ja esteettiset ohjausstrategiat eivät välttämättä ole ristiriidassa keskenään. Tietyillä energiaa säästävillä ohjausrat-

kaisuilla voidaan parantaa tilan valaistuksen laatua ja toisaalta esteettisillä ohjauksilla voidaan saada aikaan energian säästöä. (IESNA 2000)

Tässä diplomityössä *ohjauksella* tarkoitetaan yleisesti valaistuksen kytkemistä päälle tai pois ja himmentämistä. Ohjaus voi tapahtua manuaalisesti, kauko-ohjattuna tai automaattisesti. *Ohjausjärjestelmällä* tarkoitetaan kaikkia niitä ratkaisuja, joilla valaistukseen liittyvät ohjaustarpeet voidaan suorittaa.

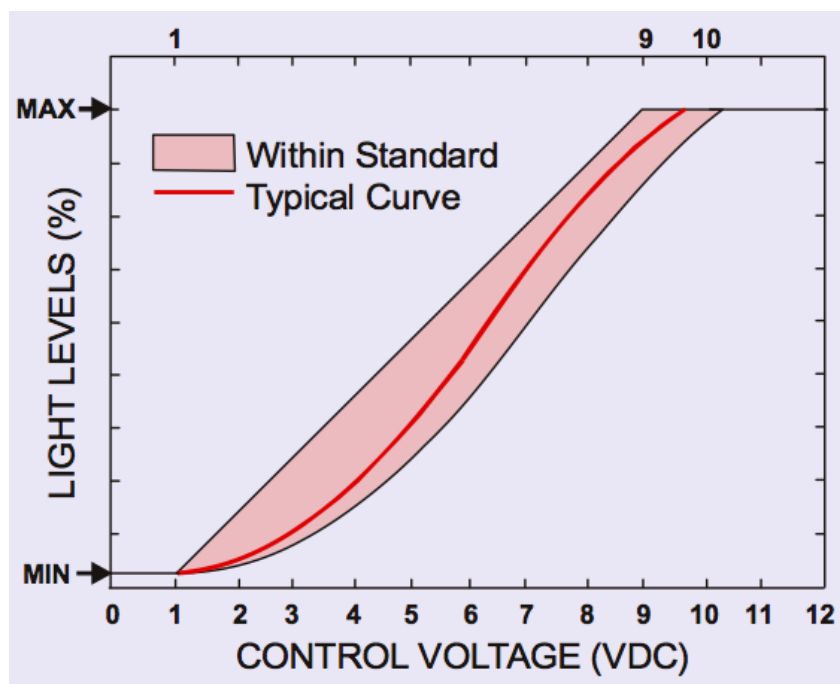
3.2 Järjestelmätyypit

3.2.1 Standardin IEC 60929 mukaiset ohjaustavat

Analoginen 1-10 V ohjaus

Kansainvälisessä liitälaitestandardissa IEC 60929 on kuvattu analogisen ohjaussignaalin käyttö loistelampuille tarkoitettujen liitälaitteiden kanssa. Ohjaussignaali on suunniteltu sellaiseksi, että useita liitälaitteita voidaan ohjata yhdestä ohjauspaikasta.

Järjestelmän nimellinen ohjausjännite vaihtelee alueella 0–10 V, mutta aktiivinen ohjausalue on 1–10 V. Tällä tavalla voidaan lisätä järjestelmän häiriön sietoisuutta. Kuvassa 3 on esitetty ohjauksen standardinmukainen toiminta ohjausjännitteen funktiona. Ohjausjännitteen avulla ei voida sammuttaa valoja. Sytyttämistä ja sammuttamista varten tarvitaan pääpiiriin kytkinlaite. 1–10 V ohjaimet ovat yksikanavaisia. On huomioitava, mitä lampuja ollaan ohjaamassa, ja eri tehoiset ja eri tyyppiset lamput onkin ryhmiteltävä eri kanaviin. Ohjaustapa ei vaadi toimiakseen erillistä virtalähdettä, sillä jokainen liitetty liitälaitte toimii virtalähteenä. Ohjauspiirin johdotuksessa on käytettävä verkkojännitteelle hyväksyttyjä kaapeleita. Ohjauspiirin johdotus voidaan kuitenkin tehdä kulkevaksi samassa kaapelissa yhdessä verkkojännitteen kanssa (Simpson 2003; Fagerhult 2009; Glamox 2009a).



Kuva 3. Valovirran suhteellinen määrä ohjausjännitteen funktiona (Simpson 2003).

Analoginen PWM-ohjaus

Standardissa IEC 60929 määriteltyä pulssinleveysmodulaatioon perustuvaa loistelamppujen liitäntälaitteiden ohjausmenetelmää ei juuri ole käytetty. Pulssinleveysmodulaatiota käytetään etenkin ledien ja kylmäkatodiloistelamppujen himmentämiseen. Siinäkin tapauksessa itse ohjauslaite toimii esimerkiksi DALI-signaalin perusteella, mutta lähettää ohjattavalle valonlähteelle pulssinleveysmodulointua signaalia. Pulssin leveyden ja valovirran säätöarvon (%) välillä on logaritminen yhteys. (Simpson 2003)

DALI

DALIn perusajatuksena on, että jokaista liitäntälaitetta voidaan ohjata yksilöllisesti, mutta järjestelmään tarvitaan kuitenkin vain yksi ohjauskaapeli kaikille liitetyille laitteille. DALI-järjestelmällä voidaan muun muassa kerätä tietoa järjestelmän tilasta (esimerkiksi palanut lamppu, laitteen tyyppi), himmentää valaistusta logaritmisesti ja kytkeä valot päälle ilman erillistä kytkinlaitetta. Alun perin DALI suunniteltiin nimenomaan loistelamppujen ohjaamista varten, mutta nykyisin DALI-järjestelmään on mahdollista liittää muitakin lampputyyppejä. (DALI-AG 2001)

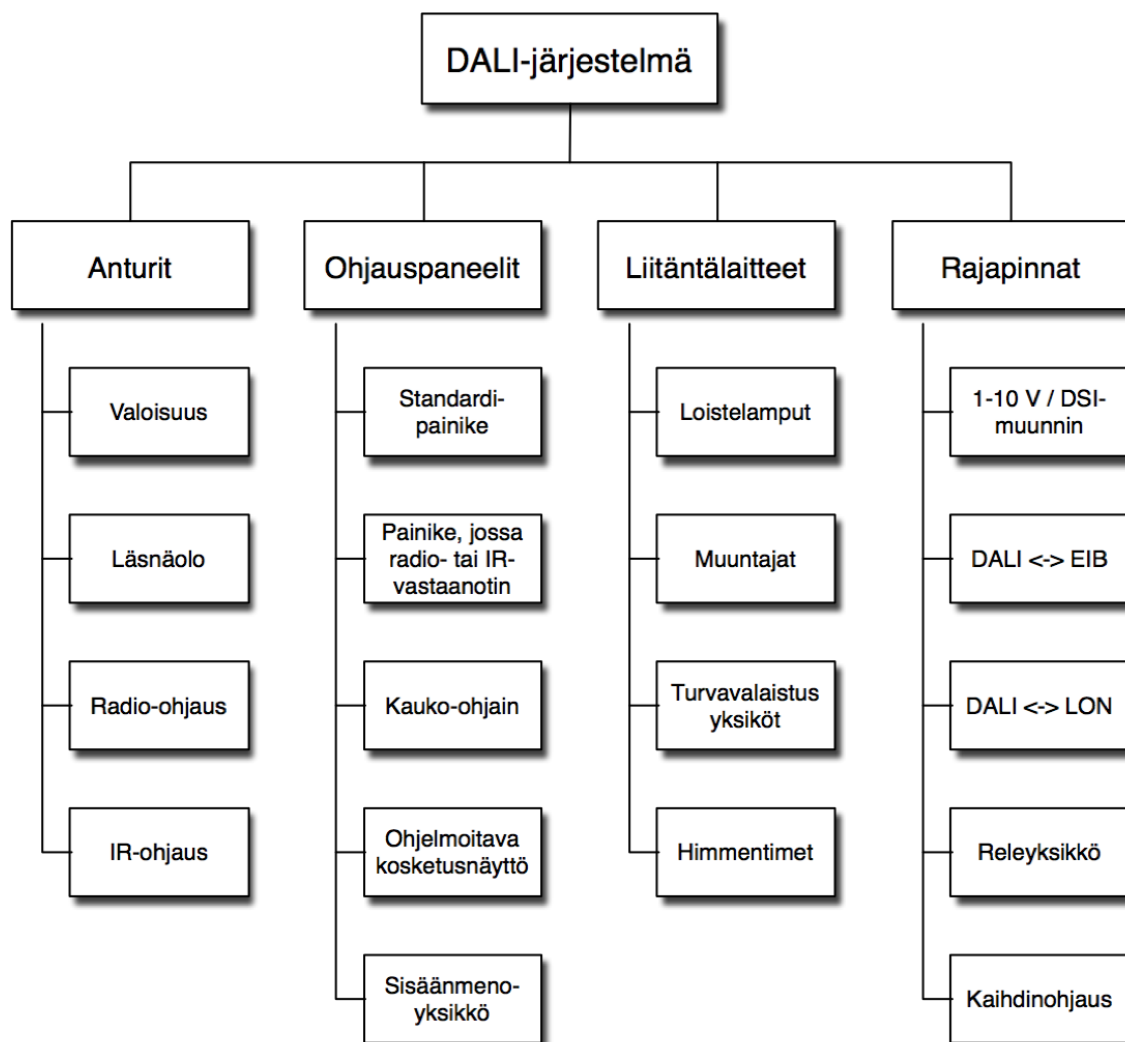
Ohjausväylän pienen siirtonopeuden ansiosta ohjauskaapeloinnin topologia on vapaa, joskaan silmukkatopologiaa ei suositella. Signaalin tulkinnan suurten toleranssien ansiosta järjestelmä on suhteellisen häiriösieloinen. Ohjauspiiri on täysin erotettu pääpiiristä, mutta se ei kuitenkaan ole SELV-piiri, minkä takia kaikkien piiriin kytkettävien laitteiden ja kaapeleiden on täytettävä verkkojännitteen vaatimukset. SELV-piirillä tarkoitetaan erotusmuuntajalla syöttävästä verkosta galvaanisesti erotettua virtapiiriä, jonka vaihtojännitteen tehollisarvo on enintään 50 V (tai 120 V tasajännitteellä) johdinten välillä tai maahan (SFS-IEC 60050-826 2005). Ohjauspiirin johtimet voivat kulkea yhdessä jännitesyötön kanssa tavallisen asennuskaapelin yhteisen vaipan sisällä. Useimmat DALI-laitteet kestävät verkkojännitteen kytkemisen ohjausliittimiin ilman laitteen rikkoutumista. Ohjausväylän suurin sallittu jännitteen alenema on 2 V, mikä vastaa noin 300 metriä 1,5 mm² kaapelia järjestelmän maksimivirralla 250 mA. (Simpson 2003)

Järjestelmässä ei tarvita erillistä keskusyksikköä, vaan kaikki tarvittava tieto tallennetaan liitäntälaitteisiin. Sen sijaan väylää varten tarvitaan virtalähde. Jokaiseen liitäntälaitteeseen tallennetaan yksilöllinen osoite, ryhmätunnukset, valaistustilanteiden asetusarvot, häivytyksajat, turvavalaisuksen himmennysarvo ja valaistusarvo syttymishetkellä. Yhdessä järjestelmässä voi olla enintään 64 osoitetta, 16 ryhmää ja 16 tilannetta. (DALI-AG 2001)

DALI-järjestelmän käyttöönottamiseksi tarvitaan yleensä ohjelmointia, joka voidaan suorittaa yksinkertaisissa tapauksissa ohjauspaneelilla tai kaukosäätimellä tai monimutkaisemmissa tapauksissa tietokoneella erityistä ohjelmistoa apuna käyttäen (DALI-AG 2001). Joillakin valmistajilla on tarjolla esivalmisteltuja ratkaisuja, joiden käyttöönotto ei vaadi ohjelmointia. Esimerkkinä tällaisista ratkaisuista ovat yhden valaisimen, jossa on integroitu vakiovaloanturi, ja kaukosäätimen yhdistelmä. Tietokoneella tehdessä ohjelmoinnissa on kuitenkin tiettyjä etuja, sillä ohjelmointi voidaan tallettaa tiedostoksi myöhempää käyttöä varten ja ohjelmistojen avulla voidaan laatia pohjakuviin karttoja, jotka sisältävät valaisimien osoitteet. Samalla ohjelmointi tulee dokumentoitua.

Liitäntälaitteiden lisäksi DALI-järjestelmään on saatavilla useita erilaisia laitteita. Laiteryhmiä on havainnollistettu kuvassa 4. Järjestelmään on saatavilla erilaisia antureita,

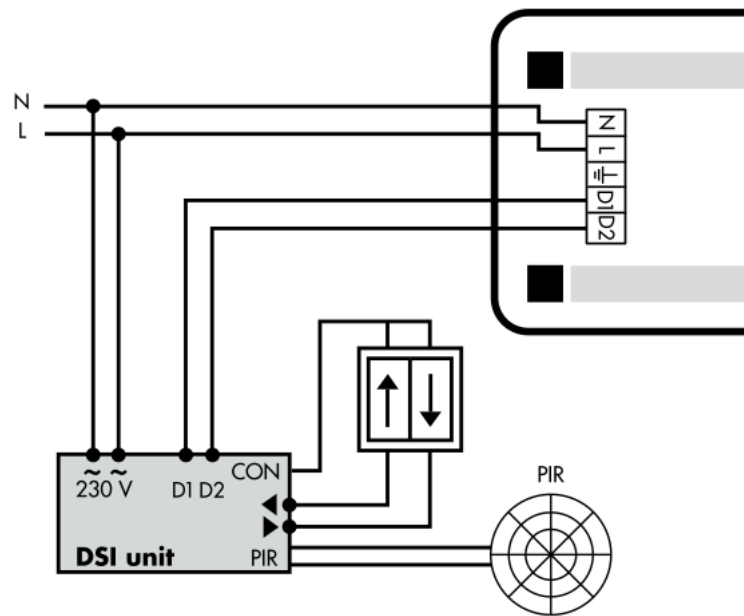
paneeleita, ohjauslaitteita ja rajapintayksiköitä tai muuntimia. Järjestelmän liitäntälaitteet ovat standardoituja, mutta ohjauslaitteet eivät.



Kuva 4. DALI-laitteet (DALI-AG 2001).

3.2.2 DSI

DSI on Tridonicin kehittämä ensimmäinen digitaalinen valaistusohjausjärjestelmä, joka tuli markkinoille vuonna 1992. Liitäntälaitteilla tai muilla komponenteilla ei ole osoitteita, vaan valaisimien ryhmittely pitää tehdä johdotuksen avulla. Keskusyksiköillä voidaan ohjata useaa kanavaa kerralla. Yli sadan liitäntälaitteen liittämistä yhteen ryhmään ei suositella. DSI-ohjauksessa himmentäminen tapahtuu logaritmisesti. DSI-signaali on alun perin tarkoitettu loistelamppujen ohjaamiseen, mutta erillisillä DSI-järjestelmään tarkoitetuilla ohjaimilla voidaan himmentää myös muita lampputyyppejä, esimerkiksi halogeenilamppuja. DSI-signaalilla voidaan sytyttää ja sammuttaa valot, joten erillistä kytkentäohjausta ei tarvita, kuten 1–10 V ohjauksessa. Kuvassa 5 on esitetty esimerkkikytkentä, jolla voidaan ohjata manuaalisesti valaistustasoa sekä sammuttaa valot läsnäoloanturilla, jos tilassa ei oleskella.



Kuva 5. DSI-ohjauksen esimerkkikytkentä (Glamox 2009a).

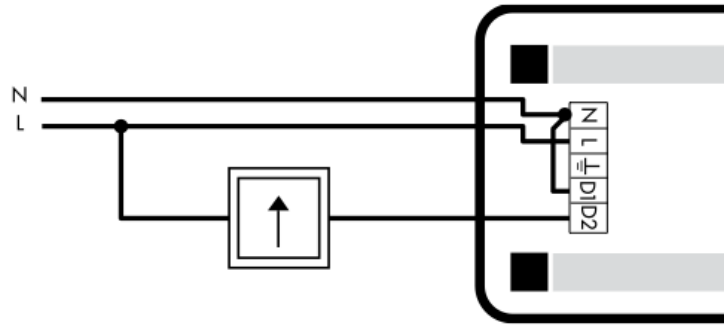
DSI-järjestelmä voidaan liittää muuntimen avulla muihin valaistusohjausjärjestelmiin, esimerkiksi DALIin. Ohjauspiiri voi kulkea samassa kaapelissa yhdessä jännitteen syötön kanssa. Vaikka DSI ei ole ohjaustapana standardisoitu, se on yleisesti käytössä. Ohjausjärjestelmä kuuluu useiden merkittävien valaisinvalmistajien tuotevalikoimaan. (Glamox 2009a)

3.2.3 DMX

Digitaalinen ohjausstandardi DMX512 on saanut maailmanlaajuisen aseman hyväksytynä järjestelmänä. Nimensä mukaisesti järjestelmällä voidaan ohjata 512 himmennyskanavaa. Ohjausjärjestelmää käytetään pääasiassa teatterivalaistuksessa ja viihde- ja esitystekniikan sovellutuksissa. Tiedonsiirrossa käytetään EIA485-sarjaliikenneväylää, jonka maksimipituus on jopa 1200 m. Todellisuudessa suurin sallittu pituus riippuu taajuudesta. DMX-järjestelmälle 250 m siirtoetäisyys on realistinen. Tiedonsiirrossa ei ole virheenkorjausta, mikä ei kuitenkaan aiheuta ongelmia esitystekniikan valaistussovelluksissa. Yleensä EIA485-väylä ketjutetaan laitteelta toiselle. Linjan viimeisellä laitteella tarvitaan kaapelin ominaisimpedanssia vastaava päätevastus signaalin heijastumisen estämiseksi. Osoitteiden antaminen järjestelmään kytketyille laitteille voi olla työlästä. Osoitteet voidaan antaa käyttämällä laitteissa itsessään olevia pyörökytkimiä tai apuna voidaan käyttää erityistä näppäimistöä, jonka avulla osoite siirretään laitteeseen ohjelmallisesti. Osoitteiden antaminen on hankalaa etenkin silloin, kun käsitellään laajoja järjestelmiä ja laitteet sijaitsevat etäällä toisistaan. (Simpson 2003)

3.2.4 Suorapainikeohjaus

Suorapainikeohjauksella tarkoitetaan elektronisen liitälaitteen kytkemistä päälle ja pois sekä himmentämistä tavallisella normaalisti auki olevalla painonapilla tai vetokytkimellä (Kuva 6). Suorapainikeohjaus on usein DALI- tai DSI-liitälaitteisiin lisätty ominaisuus.

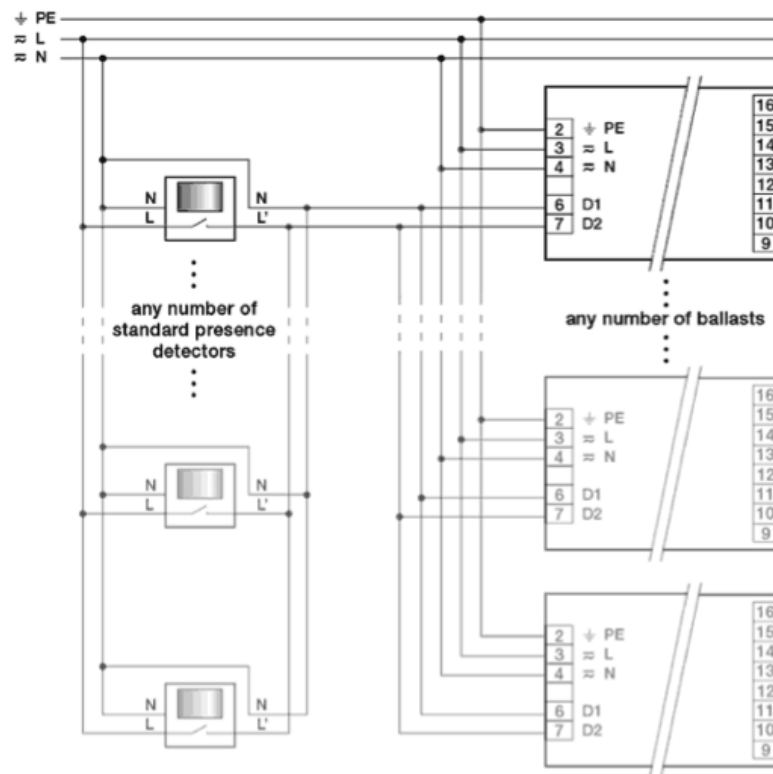


Kuva 6. Suorapainikeohjauksen kytkentäkuva (Glamox 2009a).

Suorapainikeohjauksella saadaan samat toiminnallisuudet kuin 1–10 V ohjauksella. Sil-
lä saavutetaan kuitenkin muutamia etuja. Ohjauspisteitä voi olla useita rinnakkain ja jär-
jestelmässä ei tarvita erillisiä ohjaimia. Suorapainikeohjauksen toimintaperiaate on yk-
sinkertainen. Lyhyellä painalluksella valot syttyvät tai sammuvat, pitkällä painalluksella
vuoronperään himmennetään tai lisätään lampun valovirtaa. Jos valaisimet himmenevät
eri tahdissa, voidaan ohjausryhmä synkronoida pitämällä ohjausnappia pitkään (noin 5
s) pohjassa, kun valaisimet on ohjattu suurimmalle valaistustasolle. (Glamox 2009a)

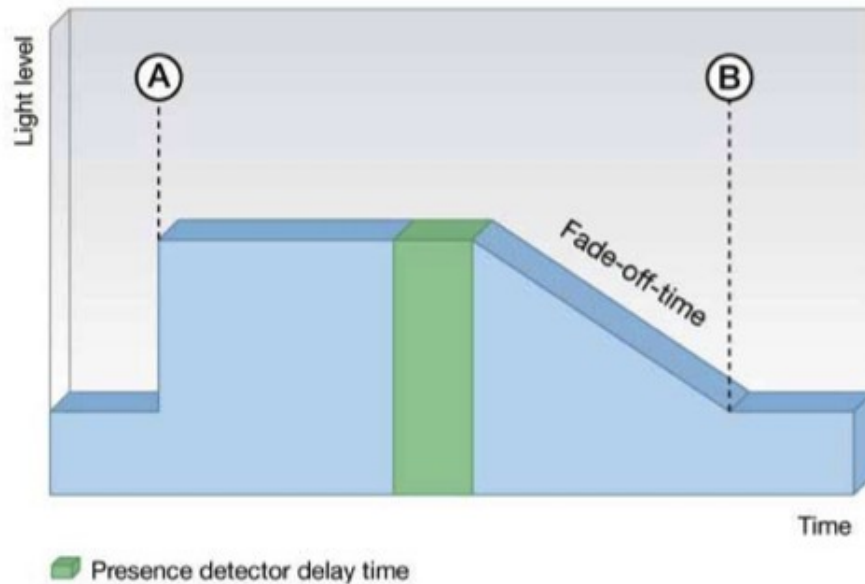
3.2.5 Käytävätoimisto

Elektronisiin liitäntälaitteisiin asetettu erityinen käytävätoiminto (corridor function) on
Tridonicin kehittämä sovellus, joka perustuu ohjaukseen läsnäolotunnistimella. Järjes-
telmä on yksinkertainen ja tunnistimeksi voidaan valita mikä tahansa tyyppi, jossa on
230 V ohjauskosketin. (Kuva 7)



Kuva 7. Käytävätoiminnon kytkentäkaavio (TridonicAtco 2009b).

Ohjaustoimintojen aikaviiveitä ja valaistustasoa voidaan muokata tietokoneella. Perustilassa valaistustaso on himmennetty 10%:iin. Hetkellä A läsnäolotunnistin havahtuu, ja antaa käskyn nostaa valaistustaso 100%:iin. Täysi valovirta pidetään päällä niin kauan, kun tilassa oleskellaan ja liiketunnistimen viiveaika vaikuttaa. Lopulta valaistustaso alkaa himmentyä asetetun häivytyksajan aikana takaisin alkutilanteeseen B. Käytävätoiminto soveltuu myös muiden tilojen kuin käytävien, kuten toimistohuoneiden, varastojen, autohallien ja aulojen, läsnäoloon perustuvaan ohjaukseen. (Kuva 8)

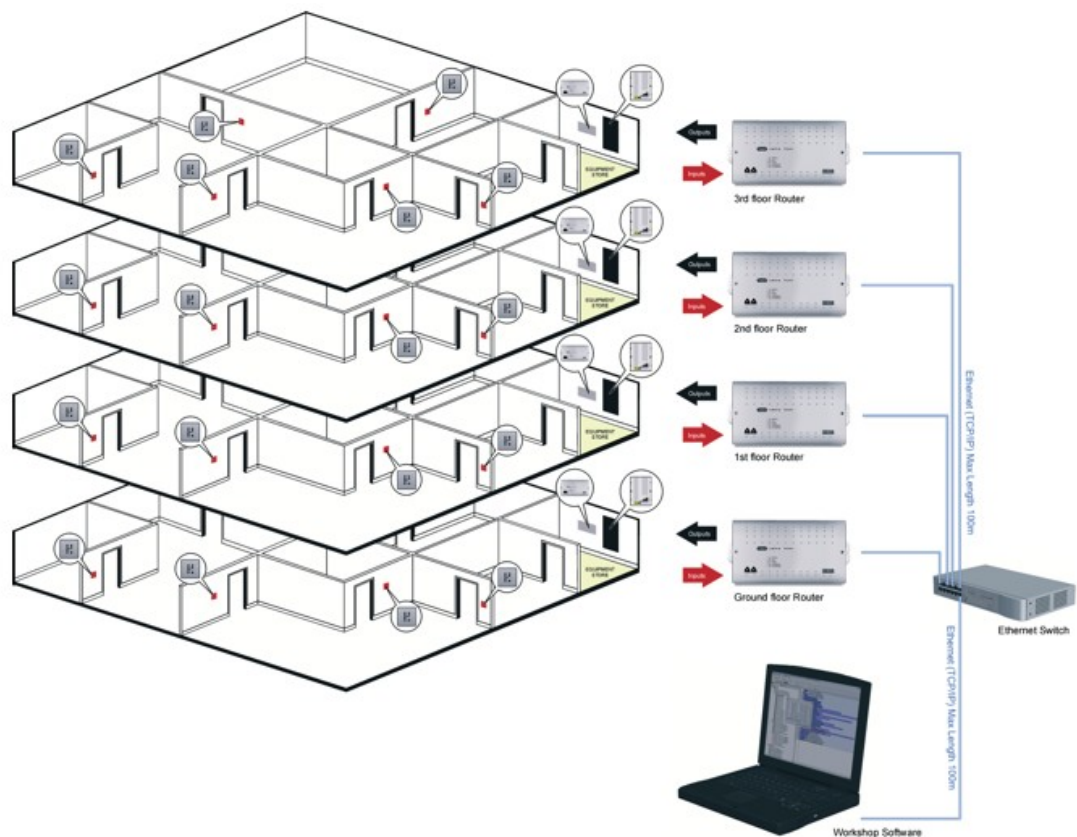


Kuva 8. Käytävätoiminnon oletusasetusten mukainen toiminta (TridonicAtco 2009b).

3.2.6 Reititinjärjestelmät

Digidim

Digidim-reititinjärjestelmä on Helvarin DALI-ohjaukseen perustuva valaistusohjausjärjestelmä. Erillisiä DALI-järjestelmiä voidaan kytkeä yhdeksi kokonaisuudeksi, jolloin voidaan rakentaa esimerkiksi koko kiinteistön kattava yhtenäinen valaistuksen hallintajärjestelmä. Ryhmiä järjestelmässä voi olla 16000. Yhden reitittimen järjestelmässä ei tarvita erillistä Ethernet-kytkintä, mutta reitittimien määrän kasvaessa jokainen kaapeloidaan 10/100 Mbit/s mukaisella Ethernet-yhteydellä kytkimelle. Siten järjestelmää voidaan laajentaa lisäämällä kytkimeen lisää yhteyksiä uusiin reitittäjiin. Ohjelmoitavia kosketusnäyttöjä voidaan myös liittää suoraan Ethernet-verkkoon. Digidim-reititinjärjestelmän periaate on esitetty kuvassa 9.



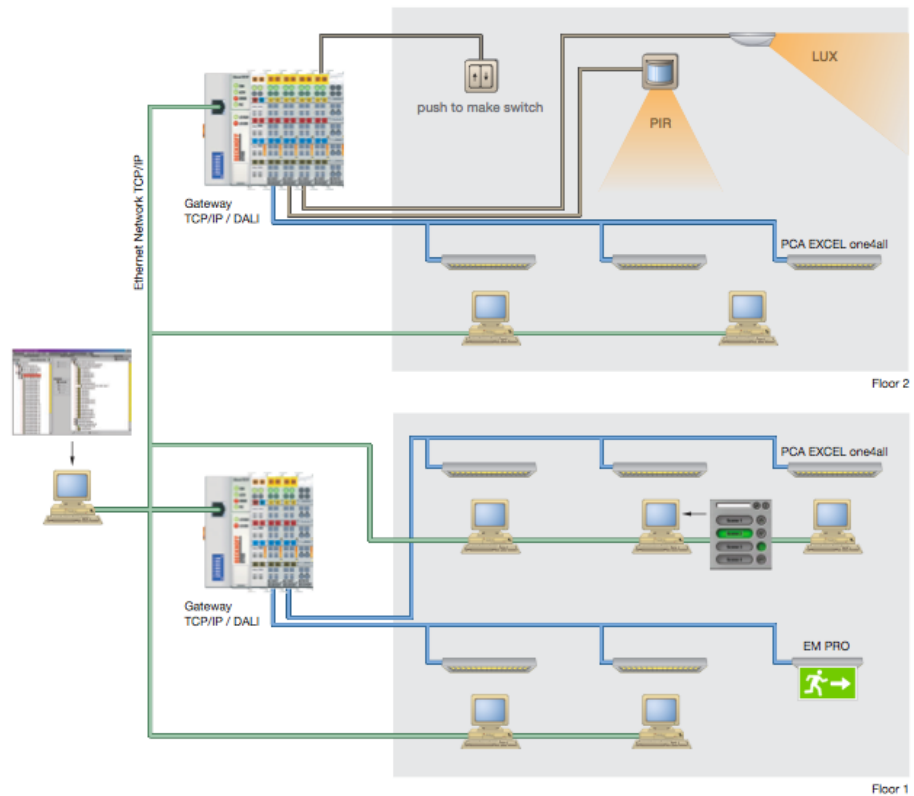
Kuva 9. Digidim-reititin -järjestelmän periaatekaavio (Glamox 2009b).

winDIM@net

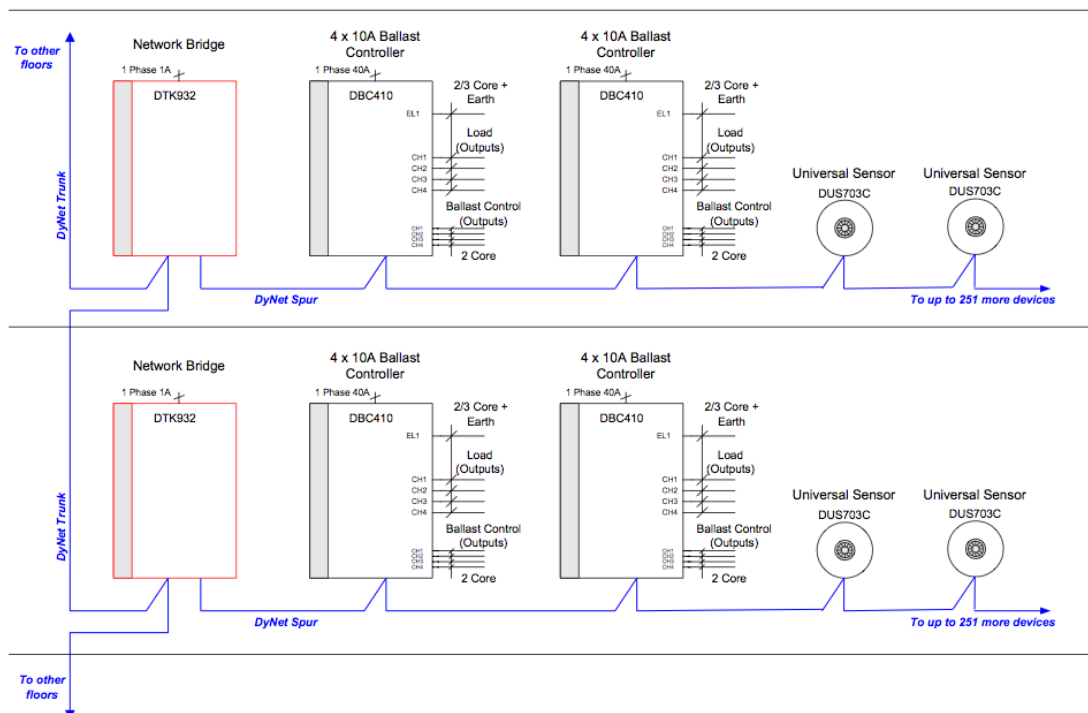
Helvarin digidim-reititinjärjestelmää vastaava järjestelmä on Tridonicin winDIM@net. Järjestelmän hierarkia on esitetty kuvassa 10. Erona Helvarin järjestelmään winDIM@net-järjestelmässä voidaan yhteen reitittimeen liittää 10 DALI-verkkoa ja lisäksi järjestelmässä on sovellukset turvalaistuksen hallintaan ja huoltoon. Lisäksi järjestelmä sisältää energiaseurannan ja raportoinnin. Reitittimiin voidaan tuoda ohjaustietoja suoraan standardipainikkeilta, läsnäoloantureilta tai valoisuusantureilta. WinDIM@net perustuu Ethernet-verkkoon, johon voidaan liittää tietokoneita ja ohjauspaneeleita.

Dynalite

Philipsin Dynalite-valaistusohtausjärjestelmä on alun perin järjestelmä on kehitetty vain valaistusohtausjärjestelmäksi, mutta se on kuitenkin laajentunut ajan kuluessa rakennusten automaatiojärjestelmäksi, jolla voidaan valaistuksen lisäksi hallita LVI-prosesseja, turvallisuusjärjestelmiä, paloilmointia, kulunvalvontaa, pimennysverhoja ja moottoreita. Järjestelmään voidaan liittää myös rakennuksen energiankulutuksen mittarointi. Järjestelmällä voidaan rakentaa erilaisia loogisia ohjauskytkentöjä, aikaohjelmia ja se voidaan myös integroida johonkin muuhun rakennusautomaatiojärjestelmään (Dynalite 2009a). Ohjausjohdotus on EIA485-väylä (Kuva 11). Tietoliikennesignaalin lisäksi väylässä siirretään tasavirtasyöttö laitteille, joita ei liitetä verkkojännitteeseen, kuten liiketunnistimille ja kosketuspaneeleille. Yhteen verkon segmenttiin ei suositella liitettävän yli 128 laitetta. Suuren rakennuksen kohdalla osoiteavaruus ja väyläpituus voi olla kuitenkin rajoittava tekijä ja siksi järjestelmää voidaan laajentaa silloilla, jolloin järjestelmään voidaan liittää yli 16,7 miljoonaa laitetta. (Dynalite 2009b)



Kuva 10. winDIM@net -järjestelmäkaavio (TridonicAtco 2005).



Kuva 11. Dynalite-järjestelmäkaavio (Dynalite 2009b).

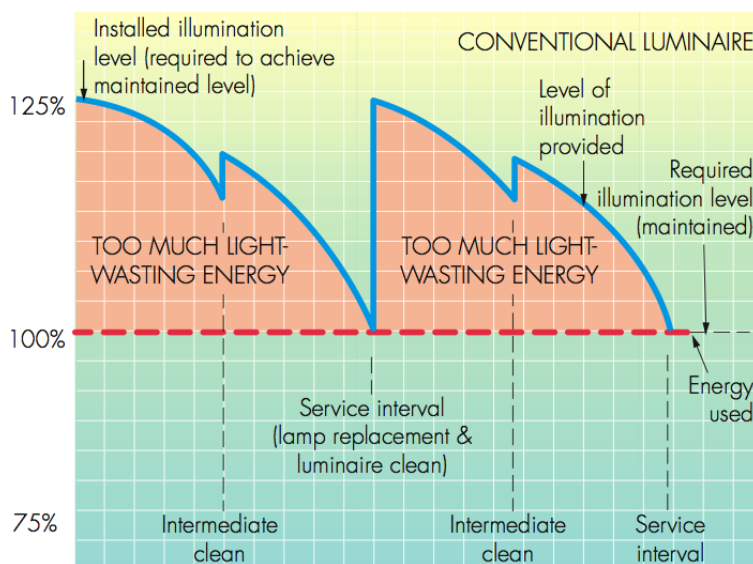
3.3 Valaistuksen ohjausstrategiat

3.3.1 Ohjaus päälle ja pois

Perinteisesti valaistusohjaukset on toteutettu päälle ja pois -ohjauksina. Ohjauslaitteena voi toimia kytkin ovipielessä, vetokytkin valaisimessa tai kontaktori. Käyttäjä pystyy vaikuttamaan valaistustasoon vain rajallisesti, riippuen asennuksesta. Monissa tiloissa, kuten varastoissa, WC-tiloissa, käytävillä ja auloissa, käyttäjällä on valittavana vain kaksi vaihtoehtoa: valot ovat joko päällä tai sammutettuina. Toimisto-, luokka- ja neuvotteluhuoneissa asennuksessa käytetään usein sellaisia kytkimiä, joilla voi sytyttää valaisimet ainakin kahdessa eri ryhmässä. Joissakin valaisimissa on mahdollista ohjata erikseen osaa lamppuista. Päälle ja pois -ohjaus on edelleen hyvin suosittu ohjaustapa valaistukselle. Tämä johtune siitä, että ohjaustavalla voidaan ohjata minkälaisia kuormia tahansa ja valaisimina voidaan käyttää yksinkertaisia malleja.

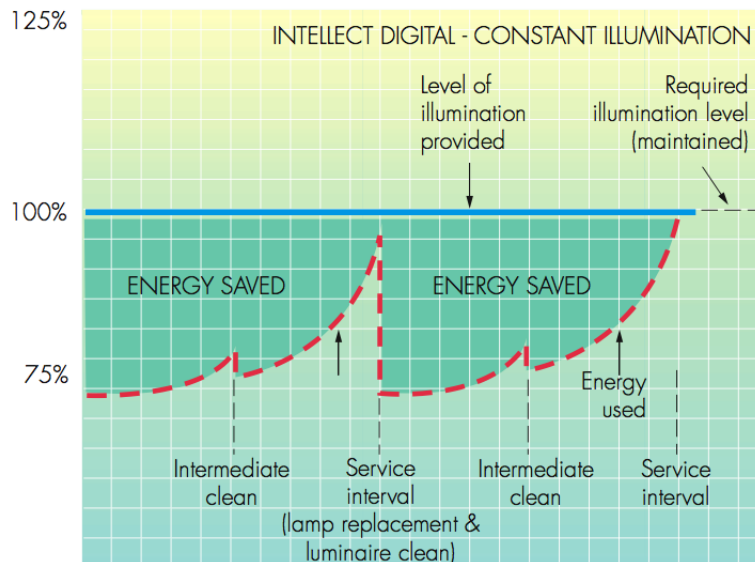
3.3.2 Vakiovalo-ohjaus

Valaistusasennus joudutaan ylimitoittamaan (Kuva 12) valaisimien ja tilojen likaantumisen ja lamppujen valovirran aleneman takia. Standardin SFS-EN 12464-1 (2003) mukaan valaistus pitää suunnitella käyttäen alenemakerrointa ja standardissa annetut valaistusvoimakkuussuosituksia tarkoittavat vanhan asennuksen arvoja.



Kuva 12. Huollon vaikutus valaistustasoon (Cooper Lighting and Security 2006).

Ylimitoituksen takia energiaa hukkaantuu. Vakiovalo-ohjauksen toimintaperiaate on esitetty kuvassa 13. Alkuvaiheessa lamppuja himmennetään enemmän kuin lamppujen vaihtovälin loppuvaiheessa, jolloin valaistustaso pysyy vakiotasolla. Kun lamppuja himmennetään, säästetään energiaa. Vakiovalo-ohjaus voidaan toteuttaa joko valaisimeen integroidulla valoisuusanturilla tai kattoon asennetulla erillisellä anturilla. Ohjausjärjestelmäksi soveltuvat muun muassa DSI, DALI ja 1–10 V.



Kuva 13. Vakiovalaistusohjauksella saavutettava energiansäästö (Cooper Lighting and Security 2006).

3.3.3 Läsäolo-ohjaus

Valaistus saattaa unohtua päälle pitkiksi ajoiksi, esimerkiksi lounasaikaan toimistorakennuksissa. Läsäolotunnistimien avulla voidaan valaistusta pitää päällä silloin, kun sitä todella tarvitaan. Läsäoloanturit voivat joko sammuttaa valot, jos tilassa ei oleskella ja sytyttää valot, kun tilaan tullaan tai läsäoloanturin avulla voidaan valaistus himmentää pienelle tasolle ennen valojen sammuttamista. Läsäoloanturi voidaan asentaa kattoon tai seinälle tai se voidaan integroida valaisimeen. Läsäoloantureihin voidaan yhdistää myös valoisuusanturiominaisuus, jolloin voidaan estää valaistuksen sytyttäminen, jos tilassa on riittävästi luonnonvaloa.

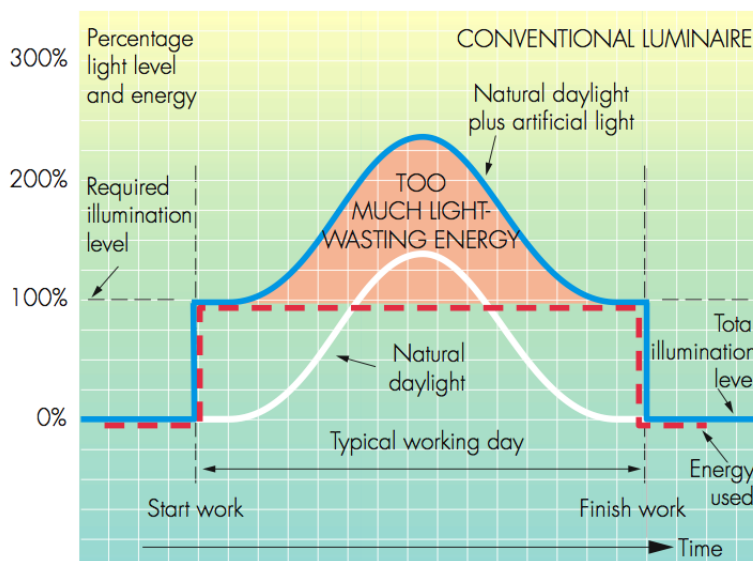
Läsäolo-ohjauksen hyödyntäminen on tehokkainta yhden henkilön käyttämissä huoneissa. Valaisimet voidaan sammuttaa, jos tilassa ei oleskella. Tiloissa, joissa oleskelee useita henkilöitä, jo yhdenkin valaisimen sammuttaminen saattaa heikentää muiden valaistusolosuhteita.

Yleensä läsäolotunnistimiin asetetaan toimintaviive, jotta ehkäistäisiin valojen tarkoitukseton sammumista. Toimintaviiveen tarkoituksena on myös estää liian usein toistuvia sytyttämisä, jotka ovat haitallisia lamppuille. Siksi lamppujen himmentäminen ensin pienemmälle valaistustasolle ennen sammuttamista voisi olla toimivampi ratkaisu. Tetrin (2001) mukaan lamppujen kuolleisuuden kannalta kytkennät vaikuttavat negatiivisemmin kuin himmentäminen ja loistelamput saavuttavat nimellisen elinikänsä myös himmennyskäytössä.

3.3.4 Päivänvalo-ohjaus

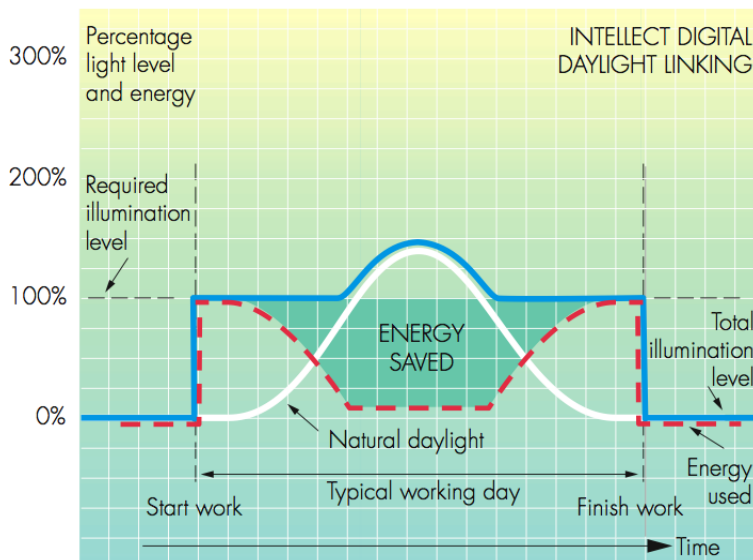
Standardin SFS-EN 12464-1 (2003) mukaan työtehtävän valaistus voidaan tuottaa kokonaan tai osittain päivänvalon avulla. Päivänvalon voimakkuus ja koostumus vaihtelevat kellonajan ja vuodenajan mukaan. Päivänvalon määrä pienenee kauempana ikkunasta ja lisäksi tarvitaan keinovalaistusta. Standardin mukaan sopivan päivän- ja keinovalon yhdistelmän luomiseksi voidaan käyttää joko automaattista tai käsikäyttöistä ohjausjärjestelmää.

Luonnonvalo on tärkeä valonlähde erityisesti huoneiden ikkunanpuoleisella reunalla. Kuvassa 14 on esitetty valaistustason vaihtelu huoneessa, jossa ei ole käytössä päivänvalo-ohjausta ja keinovalaistus on kytkettynä päälle koko työpäivän ajan. Havaitaan, että keskipäivän aikaan tarvittava valaistusvoimakkuus saadaan pelkällä luonnonvalolla, ja siten voidaan todeta, että keinovalaistukseen kulutettu energia menee hukkaan.



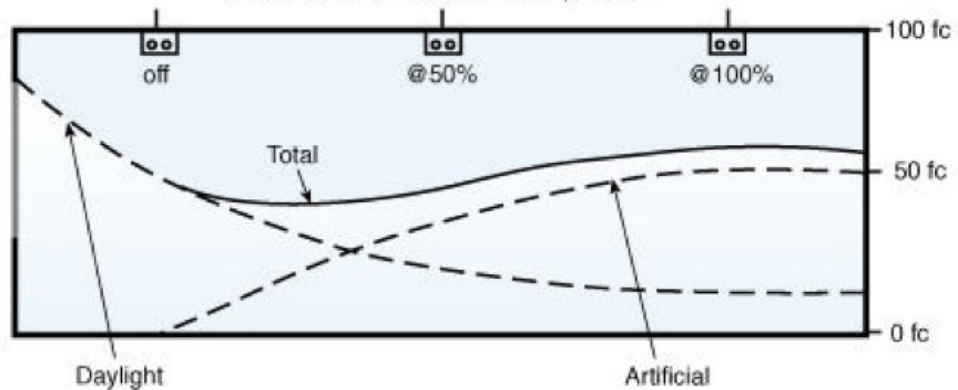
Kuva 14. Päivänvalon vaikutus sisätilan valaistustasoon (Cooper Lighting and Security 2006).

Kuvassa 15 on esitetty päivänvalo-ohjauksella saavutettava energiansäästöpotentiaali. Riippuen huoneen sijoittumisesta rakennuksessa, ikkunoiden koosta ja vuodenajasta, havaitaan, että erityisesti keskipäivän aikoihin voi tulla tilanteita, jolloin keinovalaistus voidaan lähes sammuttaa ja silti säilyttää tavoitteiden mukainen valaistustaso.



Kuva 15. Päivänvalo-ohjauksella saavutettava energiansäästö (Cooper Lighting and Security 2006).

3.3.5 Yhdistetty ohjaus



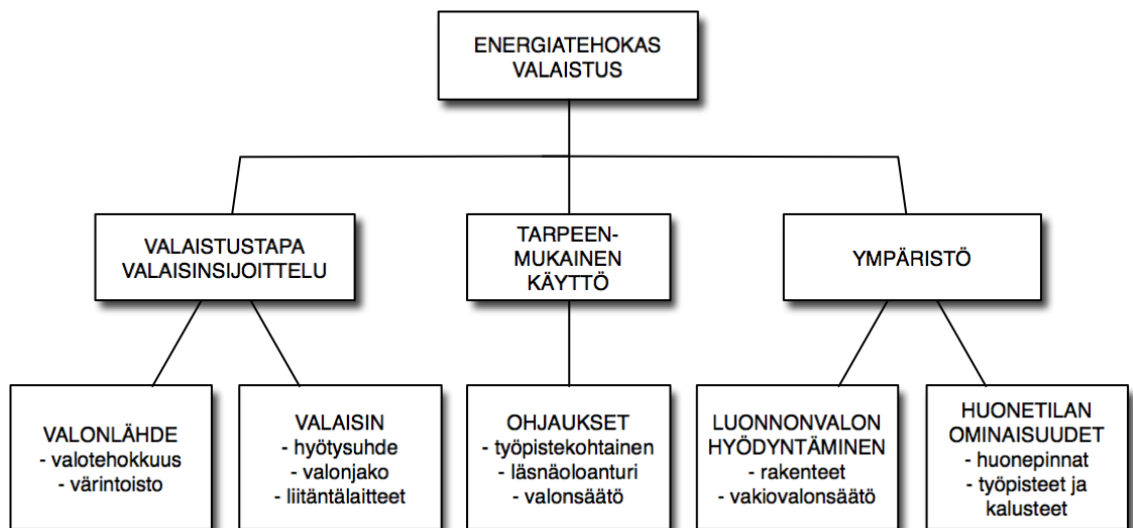
Kuva 16. Päivänvalo- ja vakiovalo-ohjauksen yhdistelmän periaate (IESNA 2000, s. 883).

Vakiovalo-, läsnäolo- ja päivänvalo-ohjausta voidaan käyttää samanaikaisesti. Ohjausjärjestelmä voidaan silti rakentaa sellaiseksi, että käyttäjä voi itse lisätä tai vähentää valaistustasoa tarpeidensa mukaisesti. Kuvassa 16 on esitetty vakiovalo- ja päivänvalo-ohjauksen yhdistelmän periaatteellinen toiminta. Vakiovalo-, läsnäolo- ja päivänvalo-ohjauksia sekä niiden yhdistelmiä voidaan toteuttaa lähes kaikilla ohjausjärjestelmillä.

3.4 Ohjauksen vaikutus energiatehokkuuteen

Valaistusasennuksen on täytettävä sille asetetut vaatimukset tuhlaamatta energiaa. Tämä tarkoittaa sopivan valaistusjärjestelmän, laitteiden ja ohjaustavan valintaa sekä luonnonvalon hyödyntämistä. (SFS-EN 12464-1 2003)

Valaistuksen energiatehokkuus koostuu kolmesta tekijästä: valaistustavasta, käyttötavasta ja ympäristöstä. Valaistustavassa huomioidaan valaisimen hyötysuhde, valonjako ja liitälaitte sekä lamppujen valotehokkuus ja värintoisto. Käyttötapa liittyy olennaisesti ohjauksiin. Ympäristö voi heikentää valaistuksen energiatehokkuutta, jos tilan pintojen värit on tumma tai työpisteet on sijoitettu epäedullisesti. Toisaalta ympäristö voi myös parantaa energiatehokkuutta, jos saatavilla on hyvin luonnonvaloa. (Kuva 17)

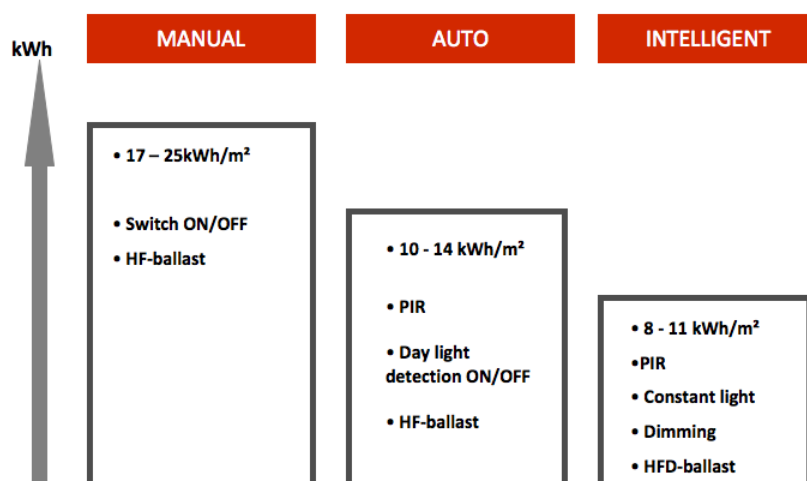


Kuva 17. Energiatehokkaaseen valaistukseen vaikuttavat tekijät (SVS 2008).

Valaistuksen energiatehokkuus on usean tekijän summa. Ohjauksen merkityksestä valaistuksen energiankulutukseen on tehty useita tutkimuksia, joista useimmat tutkimuksista käsittelevät toimistovalaistusta. Jennings et al. (2000) havaitsivat yhden henkilön toimistohuoneissa 20–26%:n energiansäästön käyttäessä läsnäolo-ohjausta verrattuna manuaaliseen kytkinohjaukseen. Läsnäolo-ohjaukseen oli aseteltu 15–20 minuutin viiveaika ennen valojen sammuttamista. Päivänvalo-ohjauksella saavutettiin vielä 20%:n lisäys energian säästössä. Niissä toimistoissa, joihin oli asennettu manuaalinen himmennin, havaittiin 9%:n energiansäästö, kun taas huoneissa, joissa käyttäjällä oli mahdollisuus ohjata kolmelamppuista valaisinta kahdessa ryhmässä, saavutettiin 23%:n energiansäästö. Tutkijat eivät havainneet eroa niiden käyttäjien välillä, joilla oli huoneessa vain kytkinohjausmahdollisuus ja niiden joilla oli kytkimen lisäksi läsnäolo-ohjaus, halukkuudessa sammuttaa valot itse lähtiessään pois huoneesta. Sen sijaan Pigg et al. (1996) havaitsivat käyttäytymismuutoksia niillä käyttäjillä, joilla oli kytkimen lisäksi läsnäolo-ohjaus. Tutkijoiden mukaan käyttäjät, joiden huoneessa oli läsnäolo-ohjaus, jättivät useammin valot sammuttamatta poistuessaan huoneesta.

Mahdollisuus ohjata valaistusta itse on todettu olevan käyttäjien mieleen (Boyce et al. 2000; Moore et al. 2002; Maniccia et al. 1999). Moore et al. (2002) havaitsivat, että käyttäjät saattoivat himmentää valaistustasoa selvästi alle suositusarvojen. Vain 25% käyttäjistä työskenteli käyttäen suositusarvojen (300–500 lx) mukaista valaistusvoimakkuutta. He eivät havainneet rakennuksen syvyydellä, ikkunapintojen määrällä tai päivänvalon esteillä olevan merkitystä käyttäjien halukkuuteen himmentää valaistusta. Sen sijaan Carter et al. (1999) havaitsivat vahvan korrelaation valon määrän ja etäisyyden ikkunasta välillä. Tämä viittaa siihen, että ihmiset aktiivisesti muuttaisivat keinovalon määrää suhteessa päivänvalon saatavuuteen.

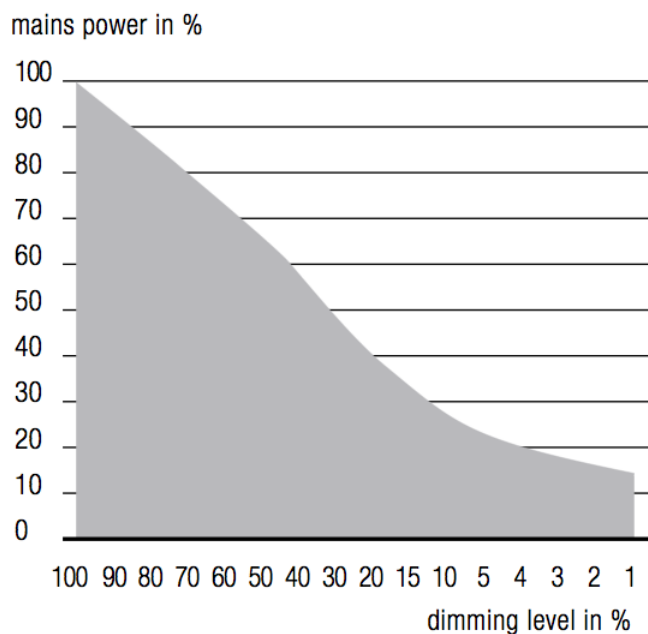
Erilaisten ohjausratkaisujen vaikutusta LENI-lukuun havainnollistaa kuva 18. Havaitaan, että älykkäällä valaistusohjausratkaisulla voidaan pienentää ominaisenergiankulutusta, toisin sanoen parantaa energiatehokkuutta.



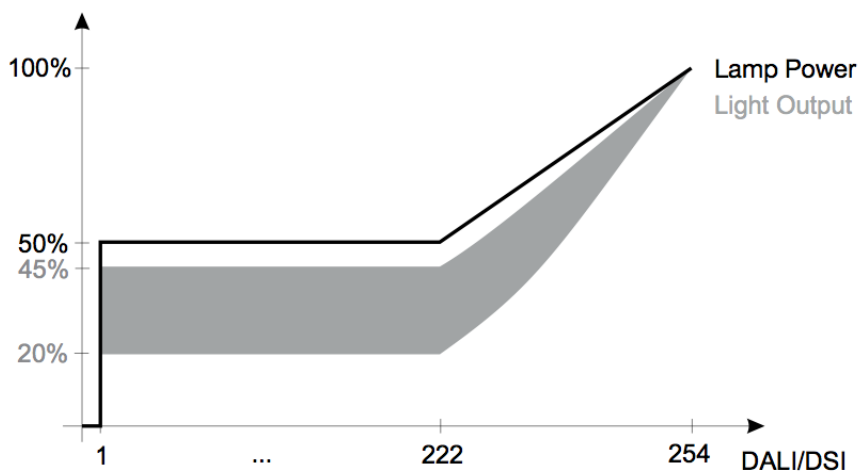
Kuva 18. Ohjausstrategian vaikutus valaistuksen kuluttamaan energiaan (Glamox 2009b).

Himentämisellä saatava energiansäästö vaihtelee lamputyyppin mukaan. Loistelampuilla himmennuksen vaikutus verkosta otettuun tehoon on lähes lineaarista (Kuva 19). Suuripaineisten purkauslamppujen kohdalla himmennyksellä saavutettava energiansääs-

tö on lähestulkoon lineaarista puolitehoon asti. Lampputyypistä riippuen puolella teholla ei saada enää valovirtaa kuin ehkä viidennes nimellisestä arvosta (Kuva 20).



Kuva 19. Erään loistelampuille tarkoitetun liitäntälaitteen tehonkulutus himmennystason funktiona (TridonicAtco 2009a).



Kuva 20. Erään suurpainepurkauslampuille tarkoitetun liitäntälaitteen tehonkulutus himmennystason funktiona (TridonicAtco 2009c).

3.5 Valaistusohjausjärjestelmän suunnittelu

Valaistusohjausjärjestelmän suunnittelun voidaan katsoa koostuvan viidestä osatehtävästä (Watt Stopper 2010):

1. Tarveselvitys,
2. ohjausstrategioiden selvittäminen,
3. laite- ja järjestelmävalinta,
4. pistesijoitus- ja johdotussuunnittelu sekä ohjausten määrittely ja
5. käyttöönotto.

Tarveselvitysvaihe on tärkeä, koska sen perusteella voidaan ymmärtää hankkeen tarkoitus ja sovellusten laajuus ja käytettävyys. Motivaationa valaistusohjausjärjestelmään investoimiseksi voivat olla esimerkiksi rakennuksen energiatodistus (energiatohokkuuden parantaminen), esteettisyys tai toiminnan tarpeet (Simpson 2003; IESNA 2000). Rakennuksen omistajat ja käyttäjät haluavat pienentää energialaskuaan mahdollisimman paljon kuitenkin tinkimättä valaistuksen laadusta ja käyttäjien turvallisuudesta. Joillakin omistajilla voi olla myös halukkuutta osoittaa sitoutumisensa kestäväan kehitykseen täyttämällä tiettyjen sertifikaattien vaatimukset (esimerkiksi LEED-sertifikaatti). Käytönmukavuutta ja jossain määrin myös tuottavuutta voidaan lisätä antamalla mahdollisuus käyttäjien ohjata valaistusta omien mieltymystensä mukaisesti. Valaistusohjausjärjestelmällä voidaan tuottaa myös tietoa kiinteistönhuollon tarpeisiin.

Tärkeintä on selvittää suunnittelutehtävän aluksi kunkin tilan toiminta. Kunkin tilan valaistusohjauksen toiminta pitäisi ensin suunnitella periaatetasolla. Kun valaistusohjauksen periaatteet on selvitetty, voidaan valaistuksen toiminnasta kirjoittaa toimintaselostus. Toimintaselostus kannattaa tehdä kaikille oleellisille tyyppitiloille. Toimistorakennuksessa tällaisia tyyppitiloja ovat muun muassa toimistohuoneet, avotoimistot, käytävät, aulat ja neuvotteluhuoneet. Toiminnallisessa suunnittelussa voi käyttää apuna valmiiksi laadittuja taulukkomuotoon tehtyjä pohjia. Selostuksessa on syytä mainita myös järjestelmän laajennettavuus huomioiden kaapelointi, laitteet ja ohjelmisto, etähallintamahdollisuudet (esimerkiksi valvomosta tai internetistä), tiedonkeruumahdollisuudet (esimerkiksi valaistuksen energian kulutus) ja liittymäraja- ja pinnat muihin järjestelmiin, esimerkiksi rakennusautomaatiojärjestelmään. Selostuksessa on syytä mainita myös viikaantuneiden laitteiden korvaamistapauksia varten korvaavien laitteiden saatavuudelle asetetut vaatimukset.

Koska rakennuksissa on erilaisia tiloja ja niillä erilaisia käyttötarkoituksia, on valittava kuhunkin tilaan sopiva valaistuksen ohjausstrategia. Tiloissa voidaan käyttää esimerkiksi luvussa 3 esitettyjä ohjausstrategioita tai niiden yhdistelmiä.

Kun tilojen käyttötarkoitus ja valaistusohjausstrategiat on valittu, voidaan valmistella alustavat suunnitelmat järjestelmän kilpailutusta varten. Valaistusohjausjärjestelmiä koskevat määräykset liittyvät lähinnä laitteiden sähköturvallisuuteen ja sähkömagneettiseen yhteensopivuuteen (EMC). Oleelliset standardit voi mainita urakkakilpailudokumenteissa. Toimintaselostuksen perusteella voidaan valaistusohjausjärjestelmä kilpailuttaa eri laitetoimittajilla. Vasta järjestelmävalinnan jälkeen on järkevää tehdä lopulliset pistesijoitus- ja johdotussuunnitelmat sekä ohjausten määrittelyt, sillä järjestelmien väliset erot varsinkin kaapeloinnissa voivat olla merkittäviä. Jos luodaan laajoja, jonkin ra-

kennuksen osan tai koko rakennuksen kattavia järjestelmiä, tarvitaan väylä- ja tietoliikennekaapelointia. Sen sijaan, jos rakennetaan paikallisia muutaman valaisimen järjestelmiä, kaapelointi ei juuri poikkea tavanomaisesta valaistuksen ryhmäkaapeloinnista. Valaistusohjausjärjestelmien kaapeloinnista on usein laadittava tarkat kytkentäohjeet asentajille ja kaapeleille on hyvä antaa yksilölliset tunnuksot tunnistamisen helpottamiseksi. Asentajilta puolestaan vaaditaan huolellisuutta, jotta kytkennät tehdään todella suunnitelmien mukaisesti. Useiden järjestelmien ryhmäkaapelointi mukaan lukien ohjauskaapelit, tulee tehdä tavallisilla asennuskaapeleilla, jotka on hyväksytty käytetylle asennustavalle ja niiden nimellisjännite U_0/U on vähintään 300/500 V, esimerkiksi SFS 2091 MMJ 5x1,5 mm² S 300/500 V. Väylä- ja tietoliikennekaapeloinneissa voidaan usein käyttää yleiskaapelointiin tarkoitettuja kaapeleita (esim. J-2YY 4x2x0,5 Cat 6 U/UTP) tai instrumentointikaapeleita (NOMAK tai JAMAK).

Tärkeässä asemassa valaistusohjausjärjestelmään investoimisessa on käyttöönottovaihe. Se vaatii useiden eri toimijoiden yhteistyötä. Ideaalitulanteessa käyttöönottovaiheeseen osallistuisivat valaistussuunnittelija, järjestelmän toimittaja, urakoitsija ja kiinteistön omistaja tai käyttäjä. Suunnittelijan pitäisi antaa sanallinen kuvaus järjestelmän toiminnasta ja järjestelmän käyttöönotto voidaan määritellä sisällytettäväksi urakoitsijalle, joka puolestaan voi ostaa käyttöönottopalvelun laitetoimittajalta. Valaistusohjausjärjestelmistä pitäisi aina myös antaa käyttäjälle ja omistajalle käyttökoulutus.

Valaistusohjausjärjestelmät eivät yleensä vaadi huoltoa. Tyypillinen toimenpide on vikaantuneen komponentin, esimerkiksi liitäntälaitteen, vaihtaminen uuteen. Tietyissä järjestelmissä komponentin vaihtaminen ei edellytä muita toimenpiteitä (DSI, 1-10 V), mutta joissain tapauksissa saatetaan tarvita ohjelmointia uuden komponentin ottamiseksi käyttöön (DALI, DMX) (Simpson 2003). Valaistustilanteiden ohjelmointitietojen uudelleen lataaminen koko järjestelmään tai sen osaan voi tulla myös kyseeseen jonkin tärkeän komponentin vikaantuessa.

4 Toimistotalon tyyppitilojen esimerkkiratkaisut

4.1 Yleistä

Esimerkkitarkastelun perustaksi valittiin tyyppillinen muunneltavia tiloja sisältävä viisi-kerroksinen toimistorakennus. Vastaavia toimistotaloja on toteutettu ympäri Suomea ja siksi katsottiin, että tämän esimerkkikohteen avulla voitaisiin tehdä edustavat tyyppitilasuunnitelmat tulevia projekteja silmällä pitäen.

Tarkasteltaviksi tyyppitiloiksi valittiin toimistohuone, avotoimisto ja käytävä. Näiden tilatyyppien osuus rakennuksen pinta-alasta ja valaistuksen energiankulutuksesta oli suurin. Jokaisesta tyyppitilasta tehtiin neljä erilaista valaistussuunnitelmavaihtoehtoa, joissa kaikissa pyrittiin käyttämään hyvälaatuisia valaisimia ja valonlähteitä. Valaisimien valintaan vaikuttivat niiden valaistusteknilliset ominaisuudet, kohtuullinen hinta ja edustavuus markkinoilla siten, että lähes vastaavanlaisia on saatavilla useita.

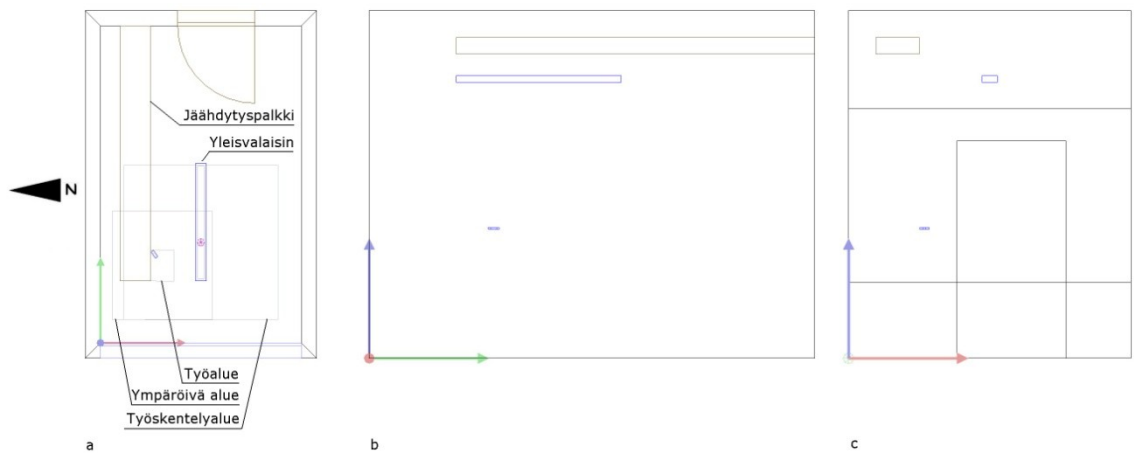
Koska aikaisempien selvitysten perusteella on osoitettu, että T16-loistelamppujen käyttö yhdessä elektronisen liitälaitteen kanssa on energiatehokas vaihtoehto verrattuna T26-loistelampuilla varustettuihin valaisimiin, joissa magneettinen kuristin. Siitä syystä tarkasteluun otettiin mukaan vain T16-loistelampuilla varustettuja valaisimia ja valaisimia, joissa käytettiin valonlähteenä ledejä. Karkeiden hintalaskelmien perusteella päädyttiin käyttämään LED-valaisimia vain käytävävalaistuksessa ja yleisvalaistuksen lisänä työpistevalaisimena.

Valaisimien liitälähteet määriteltiin alasvaloille ja LED-valaisimille valmistajien ilmoitusten mukaisesti. Loistelamppuvalaisimille liitälähteet määritettiin lamppujen tehon ja elektronisten liitälaitteiden teknisten tietojen perusteella (Helvar Oy Ab, Suomi).

Esimerkkiratkaisuina päätettiin käyttää yksinkertaisia ratkaisuja, jotka eivät edellytä laajaa ohjelmointityötä ja ohjauskaapelointia.

4.2 Toimistohuone

Huoneen pinta-ala oli $10,66 \text{ m}^2$ (2,6 m x 4,1 m). Huonekorkeus oli 3,2 m (Kuva 21). Tasopiirustuksessa on esitetty huoneen jäähdytyspalkin sijainti, valaisimen sijainti, työskentelyalue ja SFS-EN 12464-1 mukainen työalue ja sitä ympäröivä alue. Huoneen ikkunasta oli näkymä länteen. Rakennuksen ulkopuolella ei oletettu olevan merkittäviä varjostavia esteitä. Valaisin sijoitettiin siten, että valaisimen toinen pääty oli jäähdytyspalkin päädyn kohdalla ja että valaisin sijaitsisi keskellä huonetta, jotta kalustuksen käsitistyksen voisi valita vapaasti. Valaisimen asennuskorkeus valittiin sellaiseksi, että ikkunan voi helposti avata. Katon heijastuskerroin oli 0,70; seinien 0,50; lattian 0,20; jäähdytyspalkin 0,50 ja ikkunan 0,10.



Kuva 21. Toimistohuoneen tasopiirustus (a), leikkaus sivusta (b) ja leikkaus edestä (c).

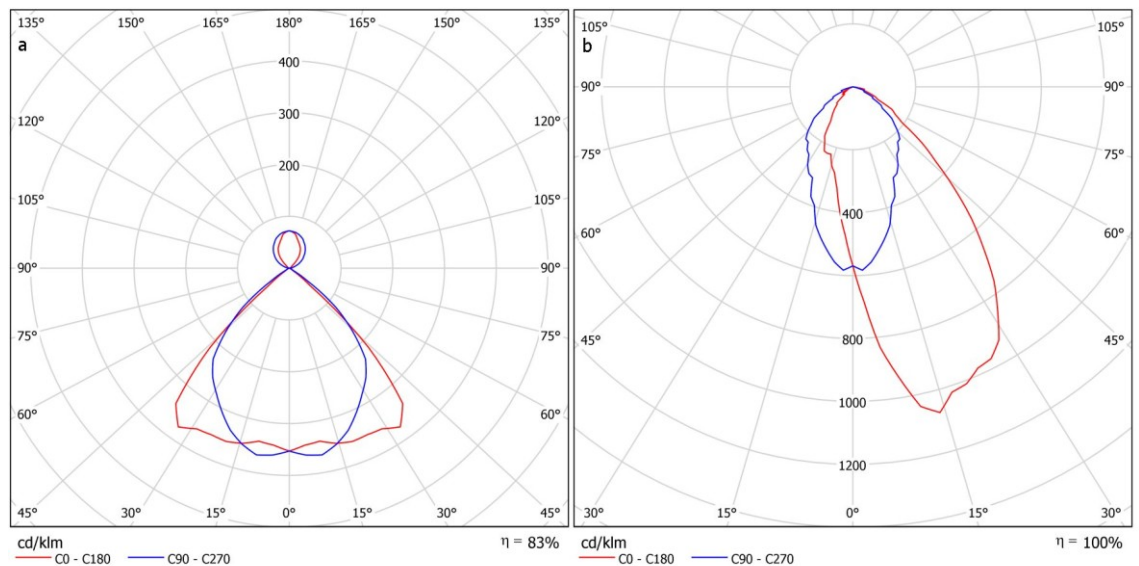
Toimistohuoneen valaistus mallinnettiin. Huoneesta laskettiin työskentelyalueen ja työalueen ja sitä ympäröivän alueen horisontaalinen valaistusvoimakkuus ja yleistasaisuus. Työskentelyalueeksi oletettiin 4 m^2 ($2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$) alue huoneen ikkunanpuoleisesta päädyistä, jonne työpöytä todennäköisesti sijoitetaan. Työalueeksi määritettiin noin A3-arkkia vastaava alue ($0,3 \text{ m} \times 0,4 \text{ m}$) mahdollisen työpöydän kohdalta. Laskettavat tasot sijoitettiin $0,75 \text{ m}$ korkeudelle lattiasta. Työaluetta ympäröi $0,5$ metrin alue, jota kutsuttiin ympäröiväksi alueeksi. Valaistuksen huoltokerroin oli $0,80$. Valaistuksen laadullisia tekijöitä ei huomioitu.

Taulukko 1. Toimistohuoneen valaistusteknilliset tulokset.

Vaihtoehto	Työskentelyalue		Työalue		Ympäröivä alue	
	$E_m \text{ (lx)}$	E_{\min}/E_m	$E_m \text{ (lx)}$	E_{\min}/E_m	$E_m \text{ (lx)}$	E_{\min}/E_m
1 ja 2	572	0,552	589	0,907	548	0,554
3 ja 4	326	0,491	789	0,585	331	0,469

Vaihtoehtoisten asennusten valaistusteknilliset tulokset ovat esitettynä taulukossa 1. Työalueella valaistusvoimakkuuden pitäisi olla vähintään 500 lx ja yleistasaisuuden $0,7$; ympäröivällä alueella valaistusvoimakkuuden pitäisi olla 300 lx ja yleistasaisuuden $0,5$ (SFS-EN 12464-1 2002). Käytännössä nämä vaatimukset on havaittu toteutuvan, jos työskentelyalueella valaistusvoimakkuus on 500 lx ja yleistasaisuus vähintään $0,6$ (ZVEI 2005). Vaatimukset täyttyivät melko hyvin kaikilla vaihtoehtoasennuksilla.

Vaihtoehdossa yksi sijoitettiin huoneeseen yksi kaksilamppuinen ripustettava valaisin, jonka valonjako oli puolisuora. Valaisimessa oli vetokytkin, josta valaisimen voi sytyttää ja sammuttaa. Valaisimeen suunniteltiin valmis liitosjohto, jossa oli EnstoNet-liitin (Ensto Building Technology, Suomi) nopeaa asennusta varten. Liitosjohto suunniteltiin niin pitkäksi, että se yltää huoneen ulkopuolelle käytävällä olevaan EnstoNet-liitäntäpisteeseen. Lampuiksi valittiin pitkäikäiset T16-loistelamput, joiden teho oli 45 W , valovirta 4300 lm (25 °C), värielämpötila 4000 K , värintoistoindeksi oli hyvin hyvä ($R_a=85$) ja joiden polttoikä oli 48000 h (3 h polttojakso, $2 \text{ h } 45 \text{ min}$ päällä ja 15 min pois päältä, valovirran alenema 20%) (T5 ECO SAVER HO $45\text{W } 840$, Aura Light International AB, Ruotsi). Valaisimessa oli yksi elektroninen liitäntälaitte, jota ei voi himmentää. Valaisimen liitäntäteho oli 96 W . Liitäntälaitteen eliniäksi oletettiin 50000 h . Valaisimen polaarinen valonjakokäyrä on esitetty kuvassa 22a.



Kuva 22. Toimistohuoneessa käytetyn ripustettavan yleisvalaisimen (a) ja työpöytävalaisimen (b) polaarinen valonjakokäyrä.

Vaihtoehto kaksi oli muuten samanlainen kuin vaihtoehto yksi, mutta valaisimessa oli elektroninen himmennettävä liitäntälaite ja valaisimeen oli integroitu läsnäolo- ja päivänvaloanturi. Valaisimen liitäntäteho oli 100 W. Ohjauksen toiminnaksi määriteltiin, että anturi himmentää valot 10%:iin, jos tilassa ei oleskella yli 5 minuuttiin ja sammuttaa valot, jos huoneessa ei oleskella yli 15 minuuttiin. Huoneeseen tultaessa valot pitää sytyttää vetokytkimestä. Anturi mittaa huoneeseen saapuvaa luonnonvaloa ja himmentää automaattisesti lamppujen valovirtaa pitäen työpisteen valaistusvoimakkuuden asettellulla tasolla. Lisäksi käyttäjälle suunniteltiin mahdollisuus säätää vetokytkimellä lamppujen valovirtaa mieltymyksiään vastaavaksi.

Vaihtoehdossa kolme ripustettavaksi valaisimeksi valittiin muuten vastaava valaisin kuin vaihtoehdossa yksi, mutta yksilamppuisena (liitäntäteho 49 W; valonjakokäyrä kuva 25a). Lisäksi työpisteeseen lisättiin työpöytävalaisin, jossa oli valonlähteenä ledit, joita voitiin himmentää (4x1,5 W; liitäntäteho 7,8 W; lepotilan kulutus 0,6 W), joiden värielämpötila oli 3000 K, värintoistoindeksi oli erittäin hyvä ($R_a > 90$) ja jonka käyttöikäsi normaalissa toimistokäytössä oli arvioitu 25 vuotta. Valaisimen kokonaisvalovirta oli 212 lm. Työpöytävalaisin oli suunnattavalla pöytäjalustalla ja pistotulpalla varustettu. Pöytävalaisimen polaarinen valonjakokäyrä on esitetty kuvassa 22b.

Neljäs vaihtoehto oli kuin vaihtoehto 3, mutta ripustettavaan yleisvalaisimeen (liitäntäteho 51 W) oli lisätty vaihtoehdon kaksi kaltainen integroitu läsnäolo- ja päivänvaloanturi. Myös ohjausprofiili oli vastaava kuin vaihtoehdossa kaksi.

4.3 Avotoimisto

Huoneen pinta-ala oli 120,40 m² (21,50 m x 5,60 m) ja käytäväalueen osuus pinta-alasta oli 32,25 m². Huonekorkeus oli 3,2 m ja käytäväalueella 2,5 m. Huone oli muodoltaan modulaarinen siten, että tilasta oli mahdollista muodostaa kahdeksan kohdan 7.2 mukaisia toimistohuoneita. Huoneen ikkunasta oli näkymä itään. Rakennuksen ulkopuolella ei oletettu olevan merkittäviä varjostavia esteitä. Huoneeseen oli mahdollista sijoittaa yhteensä 16 työpistettä käyttämällä siirreltäviä väliseiniä. Ripustettavat valaisimet sijoitet-

tiin kahden valaisimen jonoon siten, että valaisimen toinen pääty oli jäähdytyspalkin päädyn kohdalla ja että valaisin sijaitsisi keskellä mahdollista myöhemmin rakennettavaa toimistohuonetta, jotta kalustuksen käsisyyden voisi valita vapaasti. Valaisimen asennuskorkeus valittiin sellaiseksi, että ikkunan voi helposti avata.

Avotoimiston valaistus mallinnettiin. Huoneesta laskettiin työskentelyalueen ja työalueen ja sitä ympäröivän alueen horisontaalinen valaistusvoimakkuus ja yleistasaisuus. Työskentelyalueeksi oletettiin $71,75 \text{ m}^2$ ($20,5 \text{ m} \times 3,5 \text{ m}$) alue huoneen ikkunanpuoleisesta päädyistä, jonne työpöydät todennäköisesti sijoitetaan. Työalueeksi määritettiin noin A3-arkkia vastaava alue ($0,3 \text{ m} \times 0,4 \text{ m}$) yhden mahdollisen työpöydän kohdalta. Laskettavat tasot sijoitettiin $0,75 \text{ m}$ korkeudelle lattiasta. Työaluetta ympäröi $0,5 \text{ m}$ alue, jota kutsuttiin ympäröiväksi alueeksi. Valaistuksen huoltokerroin oli $0,80$. Huoneeseen sijoitettiin $1,5 \text{ m}$ korkuisia väliseiniä mahdollisen työpistesijoittelun mukaisiin paikkoihin. Vaihtoehtoisten asennusten valaistusteknilliset tulokset ovat esitettynä taulukossa 2. Standardin SFS-EN 12464-1 vaatimukset täyttyivät melko hyvin kaikissa vaihtoehtoissa.

Taulukko 2. Avotoimiston valaistusteknilliset tulokset.

Vaihtoehto	Työskentelyalue		Työalue		Ympäröivä alue	
	$E_m \text{ (lx)}$	E_{\min}/E_m	$E_m \text{ (lx)}$	E_{\min}/E_m	$E_m \text{ (lx)}$	E_{\min}/E_m
1 ja 2	598	0,442	648	0,961	579	0,662
3 ja 4	431	0,438	740	0,675	446	0,584

Vaihtoehdossa yksi sijoitettiin avotoimistoon yksi kaksilamppuinen ripustettava valaisin, jonka valonjako oli puolisuora, yksi jokaista mahdollista työpistettä kohden. Valaisimessa oli vetokytkin, josta valaisimen voi sytyttää ja sammuttaa. Valaisimeen suunniteltiin valmis liitosjohto, jossa oli EnstoNet-liitin (Ensto Building Technology, Suomi) nopeaa asennusta varten. Liitosjohto suunniteltiin niin pitkäksi, että se ylsi käytäväalueella olevaan EnstoNet-liitäntäpisteeseen. Lampuiksi valittiin pitkäikäiset T16-loistelamput, joiden teho oli 32 W , valovirta 4300 lm (25 °C), värielämytila 4000 K , värintoistoindeksi oli hyvin hyvä ($R_a=85$) ja joiden polttoikä oli 48000 h (3 h polttojakso, $2 \text{ h } 45 \text{ min}$ päällä ja 15 min pois päältä, valovirran alenema 20%) (T5 ECO SAVER HO $32\text{W } 840$, Aura Light International AB, Ruotsi). Valaisimessa oli yksi elektroninen liitäntälaitte, jota ei voi himmentää. Valaisimen liitäntäteho oli 96 W . Liitäntälaitteen eliniäksi oletettiin 50000 h . Valaisimen polaarinen valonjakokäyrä on esitetty kuvassa 22a.

Vaihtoehto kaksi oli muuten samanlainen kuin vaihtoehto yksi, mutta valaisimissa oli elektroninen himmennettävä liitäntälaitte ja valaisimiin oli integroitu läsnäolo- ja päivänvaloanturi. Valaisimen liitäntäteho oli 100 W . Ohjauksen toiminnaksi määriteltiin, että anturi himmentää valot 10% :iin, jos tilassa ei oleskella yli 5 minuuttia ja sammuttaa valot, jos huoneessa ei oleskella yli 15 minuuttia. Huoneeseen tultaessa valot pitää sytyttää vetokytkimestä. Anturi mittaa huoneeseen saapuvaa luonnonvaloa ja himmentää automaattisesti lamppujen valovirtaa pitäen työpisteen valaistusvoimakkuuden asetellulla tasolla. Lisäksi käyttäjälle suunniteltiin mahdollisuus säätää vetokytkimellä lamppujen valovirtaa mieltymyksiään vastaavaksi.

Vaihtoehdossa kolme ripustettavaksi valaisimeksi valittiin muuten vastaava valaisin kuin vaihtoehdossa yksi, mutta yksilamppuisena ja 45 W T16-loistelampulla (liitäntäte-

ho 49 W; valonjakokäyrä kuva 22a). Lisäksi työpisteeseen lisättiin työpöytävalaisin, jossa oli valonlähteenä ledit, joita voitiin himmentää (4x1,5 W; liitäntäteho 7,8 W; lepo-tilan kulutus 0,6 W), joiden värielämpötila oli 3000 K, värintoistoindeksi oli erittäin hyvä ($R_a > 90$) ja jonka käyttöiäksi normaalissa toimistokäytössä oli arvioitu 25 vuotta. Valaisimen kokonaisvalovirta oli 212 lm. Työpöytävalaisin oli suunnattavalla pöytäjalustalla ja pistotulpalla varustettu. Pöytävalaisimen polaarinen valonjakokäyrä on esitetty kuvassa 22b.

Neljäs vaihtoehto oli kuin vaihtoehto 3, mutta ripustettavaan yleisvalaisimeen (liitäntäteho 51 W) oli lisätty vaihtoehdon kaksi kaltainen integroitu läsnäolo- ja päivänvaloanturi. Myös ohjausprofiili oli vastaava kuin vaihtoehdossa kaksi.

4.4 Käytävä

Käytävä oli 40 m pitkä ja 1,5 m leveä. Huonekorkeus oli 2,5 m. Katon heijastuskerroin oli 0,70; seinien 0,50 ja lattian 0,20. Valaistuksen huoltokerroin oli 0,80. Valaistusvoimakkuus laskettiin lattiatasolta. Kaikissa käytävän valaistusvaihtoehdoissa käytettiin valaisintyypeinä alasvaloja. Käytävän valaistusteknilliset tulokset eri valaistusvaihtoehdoille on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Valaistusteknilliset tulokset.

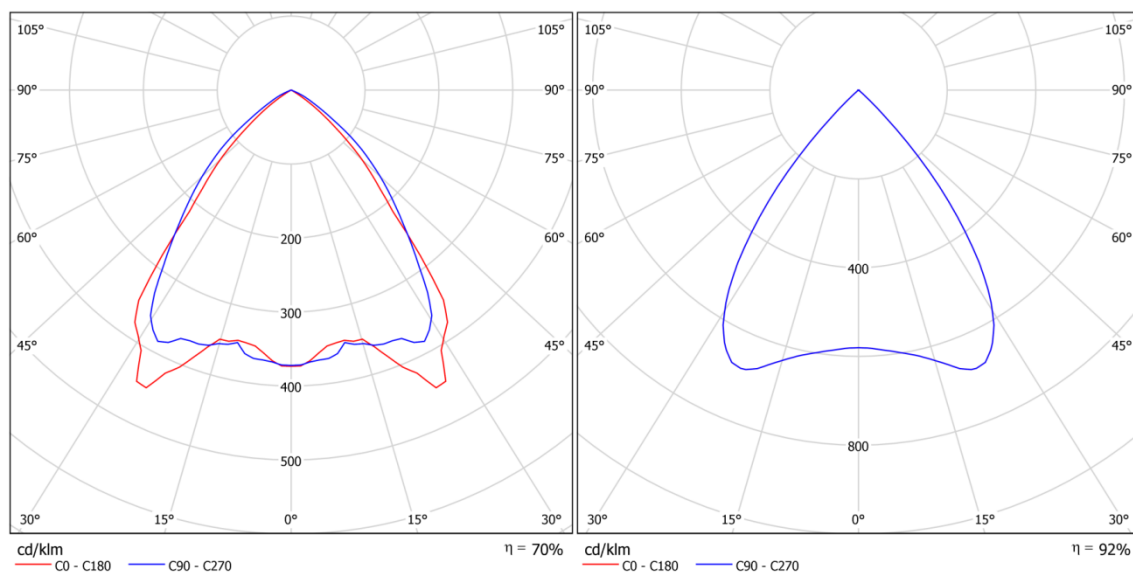
Vaihtoehto	E_m (lx)	E_{min}/E_m
1 ja 2	103	0,518
3 ja 4	110	0,361

Vaihtoehdossa yksi kattoon käytävän keskilinjalle sijoitettiin uppoasenteiset alasvalot. Valaisimissa oli yksi 26 W pienloistelamppu ja liitäntäteho oli 28 W. Valonlähteeksi valittiin pitkäikäinen pienloistelamppu, jonka elinikä 3 h tunnin polttojaksolla oli 24000 h. Valaisimen heijastin oli kiiltävällä alumiinilla päällystettyä muovia. Valaisimien asennusväli oli 3,6 m. Valaisimen polaarinen valonjakokäyrä on esitetty kuvassa 23a. Tilan valaistusta ohjataan painonapeista, joista valot voi sytyttää ja sammuttaa. Lisäksi porrasautomaatti sammuttaa valot viiveellä.

Vaihtoehto kaksi oli asennukseltaan vastaava kuin vaihtoehto yksi. Ohjaus kuitenkin muutettiin liiketunnistinohjaukseksi. Ohjauksen toiminnaksi määriteltiin, että läsnäolo-ohjain himmentää valot 10%:iin, jos tilassa ei oleskella yli 5 minuuttiin ja sammuttaa valot, jos tilassa ei oleskella yli 15 minuuttiin.

Vaihtoehdossa kolme kattoon käytävän keskilinjalle sijoitettiin uppoasenteiset alasvalot. Valaisimissa oli yksi 16 W LED-moduuli (Fortimo LED DLM 1100 lm; liitäntäteho 19 W), jonka värielämpötila oli 3000 K ja jonka värintoistoindeksi oli hyvin hyvä ($R_a = 80$). Valaisimen heijastin oli kiiltometalloitua muovia. Valonlähteen elinikä oli valaisimen valmistajan mukaan 35000 h. Valaisimien asennusväli oli 3,0 m. Valaisimen polaarinen valonjakokäyrä on esitetty kuvassa 23b.

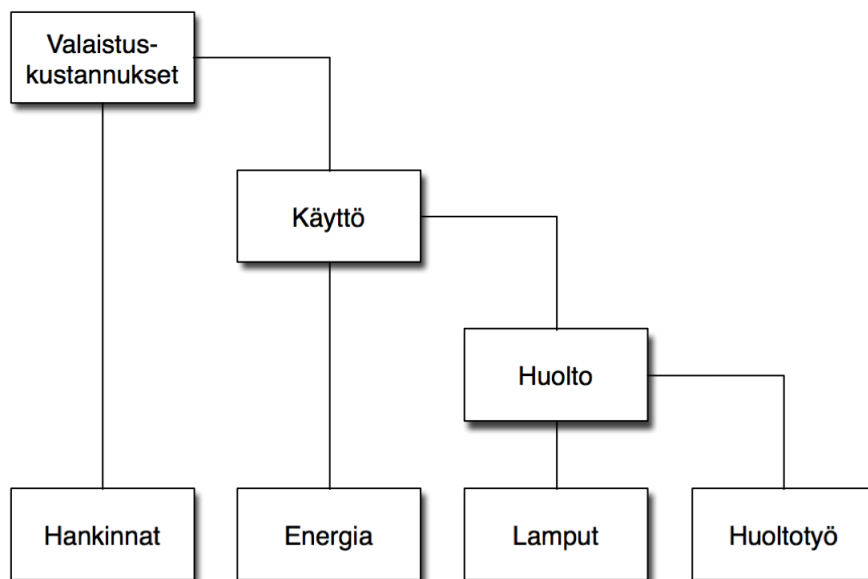
Vaihtoehto neljä oli asennukseltaan vastaava kuin vaihtoehto kolme. Ohjaus kuitenkin muutettiin liiketunnistinohjaukseksi. Ohjauksen toiminnaksi määriteltiin, että läsnäolo-ohjain himmentää valot 10%:iin, jos tilassa ei oleskella yli 5 minuuttiin ja sammuttaa valot, jos tilassa ei oleskella yli 15 minuuttiin.



Kuva 23. Käytävässä käytetyn pienloistelamppuvalaisimen (a) ja LED-valaisimen (b) polaarinen valonjakokäyrä.

5 Energiankulutus ja elinkaarikustannukset

5.1 Valaistusjärjestelmän kustannukset



Kuva 24. Valaistusjärjestelmän kustannusrakenne (Licht.de 2009).

Valaistusjärjestelmän kokonaiskustannukset voidaan jakaa pääpiirteittäin pääomakustannuksiin, joihin sisältyy hankinnat ja asennustyö, ja käyttökustannuksiin. Valaistusjärjestelmien kustannusvertailussa tulisi huomioida laatu, käyttöikä, soveltuvuus tilaan, huollettavuus sekä valaistustekniset ominaisuudet. Valaistusjärjestelmän energia- ja kustannussäästämahdollisuudet riippuvat olennaisesti valaistussuunnittelusta, lampujen valinnasta huomioiden pitkä elinikä, valotehokkuus ja värintoisto, ohjausratkaisuista ja valaisimien hyötysuhteesta. (Kuva 24)

Valaistuksen kustannukset pystytään yleensä arvioimaan kohtuullisesti, mutta valaistuksen tuottojen arviointi on vaikeaa. Valaistusjärjestelmien valaistusteknisten ominaisuuksien vaikutusta työtehoon, terveyteen tai tapaturmavaaraan ei tunnetta riittävän hyvin. Myöskään viihtyisyyteen liittyviä tekijöitä ei pystytä vertailemaan riittävästi rahassa. Usein keskitytäänkin valaistusjärjestelmien vertailussa niistä aiheutuviin kustannuksiin, eikä tuottoja ja viihtyisyyteen liittyviä arvoja huomioida. Taloudellisesti parhaaksi vaihtoehdoksi valitaan sellainen vaihtoehto, jonka kustannukset ovat pienimmät. (Aalto 2010)

5.1.1 Kiinteät kustannukset

Kiinteät kustannukset eivät riipu vuotuisesta valaistuksen käyttöajasta. Ne muodostuvat valaisimien ja valaistussähköverkon hankinta- ja asennuskustannusten koroista ja pois-toista. Alkupääomana pidetään valaistusjärjestelmää asennuksineen ja ensimmäiset lamput mukaan lukien. (Aalto 2010)

5.1.2 Energiakustannukset

Energiakustannukset riippuvat sähköenergian hinnasta, valaisimien liitäntätehosta (sisältää lamput ja liitäntälaitteet), valaistuksen käyttöajasta ja ohjaustavasta sekä päivänvalon saatavuudesta.

Aiemmin valaistuksen tehokkuutta on arvioitu tehotiheyden perusteella käyttäen yksikkönä W/m^2 . LENI-luvun yksikkö on kuitenkin $kWh/m^2/vuosi$. LENI-luku voidaan laskea kahdella eri tavalla: pikalaskentamenetelmällä ja tarkalla laskentamenetelmällä. Tarkalla menetelmällä laskettu LENI-luku on pienempi kuin pikalaskentamenetelmällä saatu arvo. Tarkka laskentamenetelmä soveltuu myös muun aikajakson käyttämiseen kuin vuosi. Laskelmat voidaan tehdä esimerkiksi kuukausi tai viikkotasolla. LENI-luvun laskentaan ei sisällytetä ulkovalaistuskuormia. Rakennuksen LENI-luku lasketaan yhtälöllä

$$LENI = W/A \quad (1)$$

Valaistukseen kuluva vuotuinen kokonaisenergia on valaistuksen käyttöön kuluvan energian määrän ja valaistuksen lepokulutuksen summa (yhtälö 2). Valaistusenergiaan sisällytetään kaikki valonlähteet ja toimilaitteet. Lepokulutukseen sisältyy liitäntälaitteiden ja valonohjausjärjestelmän kuluttama energiamäärä, mikä kuluu siitä huolimatta, että valaistus on sammutettu. Lepokulutukseen lasketaan mukaan myös turvavalaisituksen akkujen lataamiseen kuluva energia.

$$W = W_{valais} + W_{lepokul} \quad (2)$$

Valaistuksen energiankulutuksen arvioon vaikuttavat asennettu valaistuksen kokonais-teho P_n (W), erilaiset korjauskertoimet sekä käyttöaika. Vakiovalaistusohjauksella kompensoitava valovirran ylimeritys otetaan huomioon korjauskertoimella F_C , johon vaikuttavat alenemakerroin ja huoltosuunnitelma. Korjauskertoimella F_D voidaan ottaa huomioon päivänvalon saatavuus. Kertoimen arvoon vaikuttavat päivänvalokerroin (sijainti, päivänvaloalueiden osuus), valaistusvoimakkuus ja ohjausperiaate. Läsnaolon vaikutusta huomioidaan korjauskertoimella F_O , joka suhteuttaa valaistustehon käytön työntekijöiden läsnäoloaikaan. Kertoimeen vaikuttavat läsnä- ja poissaolon suhde, ohjausperiaate ja kokonaiskäyttöaika, eli valoisan t_D (h/vuosi) ja pimeän ajan t_N (h/vuosi) käyttö yhteensä. Valaistukseen kuluva energia (kWh) arvioidaan yhtälöllä

$$W_{valais} = \sum P_n \times F_C \times [(t_D \times F_O \times F_D) + (t_N \times F_O)] / 1000 \quad (3)$$

Valaistuksen lepokulutukseen vaikuttavat turvavalaisituksen osalta turvavalaisimien akkujen tarvitsema latausteho P_{em} (W) rakennuksen sisällä sekä akkujen latausaika (normaaliarvo $t_{em} = 8\,760$ h/vuosi). Lisäksi lepokulutukseen vaikuttavat liitäntälaitteiden ja ohjausjärjestelmien teho P_{pc} (W), kun valaistus on sammutettu ja aika, jolloin valaistus on sammutettu (normaaliarvo $t_y = 8\,760$ h/vuosi – t_D – t_N , yksikkö h/vuosi). Lepokulutukseen kuluva energia (kWh) arvioidaan yhtälöllä

$$W_{lepokulut} = \sum P_{pc} \times [t_y - (t_D + t_N)] + (P_{em} \times t_{em}) / 1000 \quad (4)$$

5.1.3 Lamppu- ja liitäntälaitekustannukset

Lamppu- ja liitäntälaitekustannukset riippuvat käytetyistä lamppu- ja liitäntälaitteista ja valaistuksen käyttöajasta. Myös lamppujen vaihtotapa vaikuttaa kustannuksiin. Usein lamppujen ryhmävaihtoa pidetään edullisempänä vaihtoehtona verrattuna yksittäisvaihtoon, jossa lamput vaihdetaan välittömästi niiden vikaantuessa. Sopivana ajankohtana ryhmävaihdon suorittamiseksi pidetään tilannetta, kun noin 80% lamppujen keskimääräisestä polttoiästä on saavutettu tai silloin, kun lamppujen hyötypolttoikä on saavutettu. Aina lamppujen ryhmävaihtoa ei voida kuitenkaan tehdä. Tällaisia tilanteita ovat esimerkiksi toimistohuone, jossa on vain yksi valaisin. Lamppukustannukset koostuvat lamppujen hankintahinnasta ja lamppujen vaihdon työ kustannuksesta. Loiste- ja purkauslamppujen osalta on lisäksi huomioitava jätteenkäsittelymaksu niiden sisältämän elohopean takia. (Aalto 2010)

Yksittäisvaihdossa lamppukustannukset (€/a) voidaan laskea yhtälöllä

$$K_l = n_v n_l (h_{lh} + h_{lv}) \frac{t_D + t_N}{t_l} + n_v (h_{ch} + h_{cv}) \frac{t_D + t_N}{t_c} + n_v n_l h_o, \quad (5)$$

missä n_v on valaisimien lukumäärä, n_l on lamppujen lukumäärä valaisimissa, h_{lh} on lamppujen hankintahinta (€/lamppu), h_{lv} on lamppujen vaihtotyön hinta (€/lamppu), t_D on päiväajan vuotuinen käyttöaika (h), t_N on yöajan vuotuinen käyttöaika (h), t_l on lamppujen elinikä (h), h_{ch} on liitäntälaitteen hankintahinta (€/kpl), h_{cv} on liitäntälaitteen vaihtotyöhinta (€/kpl), t_c on liitäntälaitteiden elinikä (h) ja h_o on ongelmajättemaksu (€/lamppu). (Aalto 2010)

Ryhmävaihdossa lamppujen vaihtotyön hinta yleensä on alhaisempi kuin yksittäisvaihdossa ja se pitää huomioida laskelmissa. Usein joudutaan kuitenkin käyttämään ryhmä- ja yksittäisvaihdon yhdistelmää, mikä tekee laskelmista monimutkaisia. (Aalto 2010)

Liitäntälaitteet ovat lamppujen ohella käytössä kuluvia laitteita. Usein liitäntälaitteiden elinikänä pidetään noin 50000 h, mutta aikaisvikaantumiset ovat mahdollisia. Liitäntälaitteet on luonnollisesti vaihdettava yksittäisvaihtona, sillä ilman toimivaa liitäntälaitetta valaisin ei pysty toimimaan. Liitäntälaitteen vaihtokustannus koostuu uuden liitäntälaitteen hankinta- ja asennuskustannuksista.

5.1.4 Huoltokustannukset

Huoltokustannukset johtuvat valaisimien puhdistuksesta ja korjauksesta. Kustannuksia on vaikea arvioida johtuen vaihtelevista paikallisista olosuhteista ja huollon laajuudesta. Kustannukset muodostuvat työpalkoista, huollossa tarvittavien apuvälineiden hankinnasta ja käytöstä, puhdistusvälineistä ja -aineista varaosista. (Aalto 2010) Jos valaisimien huolto tilataan palveluja tarjoavalta yritykseltä voidaan kustannukset määrittää helpommin, sillä kustannuksissa huomioidaan vain yrityksen tuntiveloitus tai kiinteä hinta. Tässä tapauksessa on kuitenkin kiinnitettävä huomio tarjottavan palvelun kattavuuteen ja laatuun. Usein huoltokustannuksista huomioidaan vain puhdistuksesta aiheutuvat kustannukset, eikä korjauskustannuksia.

Puhdistuskustannukset (€/a) voidaan laskea joko yhtälöllä

$$K_h = \frac{n_v(h_h + h_a)}{t_h}, \quad (6)$$

jossa n_v on valaisimien lukumäärä, h_h on puhdistuksen työkustannukset lamppua kohti (€/kpl), h_a on puhdistusväline- ja ainekustannukset valaisinta kohti (€/kpl) ja t_h on puhdistusten aikaväli vuosina tai kustannukset voidaan laskea yhtälöllä

$$K_h = \frac{t_p h_p}{t_h}, \quad (7)$$

jossa t_p on puhdistustyöhön kuluva aika (h/valaisin), h_p on puhdistustyön tuntiveloitus (€/h) ja t_h on puhdistusten aikaväli vuosina.

5.1.5 Laskentakorko ja pitoaika

Olennaista kustannuslaskennassa on aikatekijän huomioon ottaminen verrattaessa eriaikaisia suorituksia. Laskentakoron tehtävänä on sijoittaa eriaikaiset suoritukset oikeaan suhteeseen keskenään. Laskentakorolla tarkoitetaan sitä korkokantaa, jolla rahaa voidaan saada investointitarkoitukseen ja sen tulee olla suurempi kuin se korkein korko, joka joudutaan maksamaan hanketta rahoitettaessa, sillä sijoitetulle pääomalle pitää antaa myös tuottovaatimus.

Pitoaikana valaisimille voidaan teollisuudessa pitää 8–15 vuotta ja toimistoissa noin 20 vuotta. Sähköjohtojen osalta pitoaika voi olla pidempi. (Aalto 2010)

Valaistusjärjestelmien kustannusten arvioinnissa käytetään erilaisia menetelmiä, joista mainittakoon nykyarvomenetelmä, annuiteettimenetelmä ja takaisinmaksuaikamenetelmä. Nykyarvomenetelmä ja annuiteettimenetelmä ottavat huomioon koron ja pitoajan vaikutuksen, sen sijaan yksinkertaisessa takaisinmaksuaikamenetelmässä korkoa ei huomioida. Tässä diplomityössä valaistusjärjestelmien kustannusten arvioinnissa on käytetty nykyarvomenetelmää.

5.2 Tyypпитilojen esimerkkiratkaisujen kustannukset

Tavoitteena oli selvittää valaistusohjausjärjestelmien vaikutusta energian kulutukseen ja valaistusjärjestelmän kustannuksiin. Energian kulutusta arvioitiin LENI-luvulla huomioiden luvussa 4 esitetyt toiminnalliset vaatimukset kussakin tilassa. Laskelmat tehtiin luvussa 4 esitellyille toimistotalon tyypпитiloille. Elinkaarikustannukset laskettiin jokaisen tyypпитilan kaikille valaistusasennusvaihtoehdoille. Elinkaarikustannuksissa huomioidtiin investointikustannukset valaisimiin, lamppuihin ja ohjausjärjestelmiin, lamppu- ja liitäntälaittekustannukset, huoltokustannukset ja energiakustannukset. Tarkastelujaksoksi valittiin 20 vuotta (tyypillinen toimistovalaisusjärjestelmille) ja korkokannaksi 7% (sisältää lainakustannukset ja tuottovaatimuksen).

Valaistusvaihtoehtoja vertailtiin keskenään kussakin tyypпитilassa niiden elinkaarikustannusten ja LENI-lukujen perusteella. Elinkaarikustannukset laskettiin nykyarvomenetelmällä, jossa investoinnin kustannusten nykyarvo K (€) ajalta N voidaan laskea yhtälöllä

$$K = H + \sum_{n=1}^N \frac{q_n}{(1+i)^n}, \quad (8)$$

missä H on hankintameno (€), N on pitoaika, i on korkokanta ja q_n on juokseva kustannus vuonna n. Vuosittaiset juoksevat kustannukset oletettiin keskenään yhtä suuriksi, joten edellä mainittu yhtälön geometrinen sarja voidaan muuntaa muotoon

$$K = H + \frac{(1+i)^N - 1}{i(1+i)^N} q \quad (9).$$

Valaistusasennuksilla ei oletettu olevan jäännösarvoa tarkastelujakson lopussa. Nykyarvo menetelmää päätettiin käyttää tässä diplomityössä siitä syystä, että se mahdollistaa kustannusten kehittymisen tarkastelun elinkaaren aikana. Laskemalla kumulatiiviset kustannukset eri vaihtoehtoille voidaan tarkastella, missä vaiheessa jokin alkuinvestoinnistaan kalliimpi vaihtoehto mahdollisesti alkaisi tuottaa voittoa verrattuna halvimpaan vaihtoehtoon. Nykyarvomenetelmää käytetään myös useissa valaistuksen elinkaarikustannusten laskentaan tarkoitetuissa ohjelmistoissa.

Investointeihin sisällytettiin valaisimien hinta, valaisimien kaapelointikustannus ja asennuskustannus sekä loistelamput. LED-moduulit sisältyivät valaisimien hintaan. Valaisimien hinnat kysyttiin valaisintoimittajilta ja hinnoissa huomioitiin urakoitsijoiden saamat alennukset, kun valaisimia ostettaisiin 150 kpl erä. Tyypilliseen toimistotaloon tarvitaan yleensä noin 30 kpl toimistovalaisimia (toimistohuoneet ja avotoimistot) ja 30 kpl alasvaloja (käytävät ja aulat) jokaista kerrosta kohden lukuun ottamatta teknisiä kerroksia. Valaisimien hintaan lisättiin mahdollinen urakoitsijan kate, jonka arvioitiin olevan 25%. Valaisimien asennuskustannus arvioitiin kokemuseräisesti perustuen aikaisemmista urakointiprojekteista saatuihin kokemuksiin ja sähköurakoitsijoiden kanssa käytyihin keskusteluihin. Valaisimien kaapelointikustannukset huomioitiin, mikäli ne poikkesivat toisistaan eri asennusvaihtoehtojen välillä. Toimistohuoneessa ja avotoimistossa käytettiin valaisimeen integroitua ohjausratkaisuja, joten kaapelointi ei poikennut eri vaihtoehtojen välillä. Sen sijaan käytävässä valaisimien kaapelointitapa poikkesi toisistaan eri vaihtoehtojen välillä. Vaihtoehdoissa 1 ja 3 käytävään oletettiin asennettavan 1 valaistusryhmä (MMJ 3x1,5S), 4 painonappia (johdotus MMJ 4x1,5S) ja jakokeskukseen kyseiselle lähdölle kontaktori ja porrasautomaatti. Vaihtoehdoissa 2 ja 4 käytävään oletettiin asennettavan 1 valaistusryhmä (MMJ 5x1,5S) ja 2 liiketunnistinta. Osoittautui, että vaihtoehtojen 2 ja 4 kaapelointi (ja tarvikkeet) olivat 20 € kalliimpia kuin vaihtoehtojen 1 ja 3. Vaihtoehdoille 2 ja 4 käytettiin laskelmissa kaapelointikustannuksena 20 € (0 € vaihtoehdoille 1 ja 3).

Lamppujen hinta kysyttiin valmistajalta perustuen oletukseen, että ostetaan yksi laatikollinen (25 lampua) yksittäisvaihdon tarpeisiin. LED-moduulin hinta kysyttiin valmistajalta. LED-moduulin hintaan liittyy kuitenkin suuri epävarmuus, sillä on oletettava, että tulevaisuudessa niiden hinta laskee oleellisesti.

Ajanjaksolla 1.1.2000–1.1.2010 energian hinta on kasvanut keskimäärin 4% vuodessa (EMV 2011) ja samanlaisen kasvun oletettiin jatkuvan koko tarkastelujakson. Tarkastelujakson keskimääräiseksi energian hinnaksi arvioitiin 0,20 €/kWh (sisältäen siirron ja veroluonteiset maksut). Energian hintaan ei sisällytetty mahdollisia tehomaksuja.

Puhdistus- ja huoltovälin oletettiin olevan 4 vuotta. Puhdistus- ja huoltokustannukseksi valaisinta kohden arvioitiin olevan 2 €. Hinnan oletettiin perustuvan 4–5 minuutin työmenekkiin ja 25 €/h veloitukseen.

Lamppu- ja liitäntälaittekustannukset muodostuivat lamppujen hankintahinnasta, lampunvaihtotyöstä, lamppujen ongelmajättemaksusta, liitäntälaitteiden hankintahinnasta ja liitäntälaitteiden vaihtotyöstä. Loistelamppujen hintana käytettiin 15 €/kpl, pienloistelamppujen 12 €/kpl ja LED-moduulin hintana 50 €/kpl. Lampunvaihtotyön oletettiin kustantavan 2 €/lamppu perustuen 4–5 minuutin työmenekkiin ja 25 €/h veloitukseen. Loiste- ja pienloistelamppujen ongelmajättemaksuksi oletettiin 1 €/lamppu. Liitäntälaitteen hankintahinnaksi arvioitiin 60 €/kpl perusmalleille ja 80 €/kpl himmennettävälle malleille perustuen oletukseen, että liitäntälaitteita ostetaan muutamia kappaleita kerrallaan ennenaikaisia vikaantumisia varten. Liitäntälaitteiden vaihtotyön hinnaksi arvioitiin 25 €/kpl perustuen 30 min työmenekkiin 50 €/h veloituksella.

5.3 Toimistohuone

5.3.1 Energiankulutus

Energian kulutus arvioitiin valaistusvaihtoehdoille 1–4 LENI-luvulla käyttäen DIALuxin energianarviointityökalua. Toimistohuoneen energiankulutus eri vaihtoehdoille ovat esitettyinä taulukossa 4.

Taulukko 4. Valaistusenergiankulutus toimistohuoneessa.

Valaistusvaihtoehto	1	2	3	4
Kokonaisenergia (kWh/a)	146,39	78,00	86,92	46,02
LENI (kWh/m ² /a)	13,73	7,32	8,15	4,32

Vaihtoehdon 1 energian kulutus oli selvästi suurin (LENI 13,73 kWh/m²/a). Kun vaihtoehdon 1 valaisimeen lisättiin läsnäoloon ja päivänvaloon perustuva automaattinen ohjaus (vaihtoehto 2) energiankulutus pieneni 47% verrattuna vaihtoehtoon 1. Kun paikallistettu yleisvalaistus vaihdettiin yhdistettyyn paikallis- ja yleisvalaistukseen (vaihtoehto 3) energian kulutus pieneni 41% verrattuna vaihtoehtoon 1. Läsnäoloon ja päivänvaloon perustuva ohjaus yhdessä yhdistetyn paikallis- ja yleisvalaistuksen kanssa (vaihtoehto 4) pienensi energiankulutusta 69% verrattuna vaihtoehtoon 1. Saatuja arvoja voidaan kokonaisuutenaan energiatehokkaina, jos LENI-lukuja verrataan kuvassa 18 esitettyihin arvoihin. LENI-lukuun vaikutti ohjauksen lisäksi merkittävästi myös valaistustapa (vaihtoehto 1 vs. vaihtoehto 3).

5.3.2 Elinkaarikustannukset

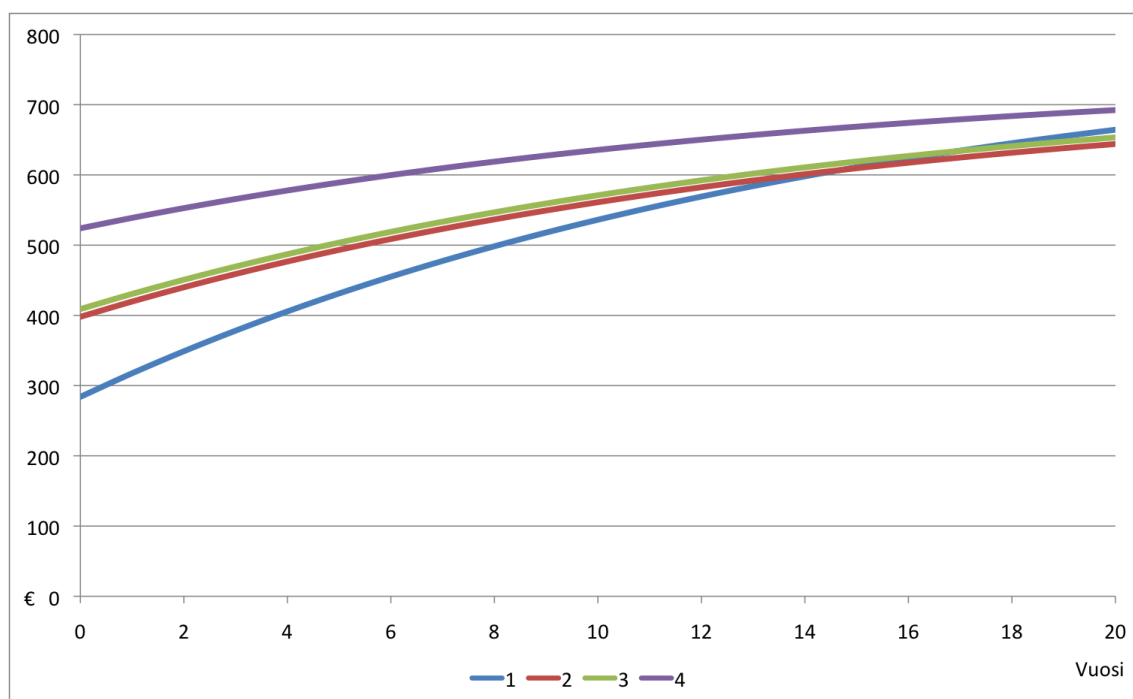
Toimistohuoneen valaistusvaihtoehtojen 1–4 elinkaarikustannusten nykyarvot on esitetty taulukossa 5. Elinkaarikustannuksia tarkasteltaessa edullisimmaksi vaihtoehdoksi osoittautui vaihtoehto 2 (644 €). Vaihtoehto 3 oli 1,5%, vaihtoehto 1 3,2% ja vaihtoehto 4 7,5% kalliimpi kuin vaihtoehto 2. Vaihtoehdoissa, joissa ei ollut automaattista ohjausjärjestelmää (1 ja 3) voidaan havaita energian merkittävä osuus elinkaarikustannuksissa. Kaikissa vaihtoehdoissa investoinnin osuus elinkaarikustannuksista oli erittäin merkittävä, sillä kaikissa vaihtoehdoissa paitsi vaihtoehdossa 1, investoinnin osuus kustannuksista oli selvästi suurin. Sen sijaan huollon osuus oli kaikissa vaihtoehdoissa merkityksellömän pieni. Lamppu- ja liitäntälaittekustannusten pieni osuus (enintään 12% koko-

naiskustannuksista) on selitettävissä laskelmissa käytetyllä pitkäikäisellä teknologialla ja vuosittaisilla käyttötunneilla.

Taulukko 5. Elinkaarikustannusten nykyarvot ja osuudet toimistohuoneessa.

Valaistusvaihtoehto	1		2		3		4	
Kustannuslaji	€	%	€	%	€	%	€	%
Investointi	284	43%	398	62%	409	63%	524	76%
Lamput ja liitäntälaitteet	65	10%	75	12%	55	8%	6	9%
Huolto	5	1%	5	1%	5	1%	5	1%
Energia	310	47%	165	26%	184	28%	98	14%
Yhteensä	664	100%	644	100%	653	100%	692	100%

Koska elinkaarikustannuksien nykyarvoissa ei ollut kovin suuria eroja (Taulukko 5), suurempi alkuinvestointi alkaa tuottamaan voittoa verrattuna hankintahinnaltaan edullisimpaan vaihtoehtoon vasta pitkän ajan kuluttua käyttöönotosta. Toimistohuoneen valaistusvaihtoehtojen elinkaarikustannusten kehittyminen on esitetty kuvassa 25, josta voidaan havaita, että vaihtoehto 1 on edullisin vaihtoehto ensimmäiset 15 vuotta, jonka jälkeen vaihtoehdot 2 ja 3 tulevat edullisimmiksi.



Kuva 25. Toimistohuoneen valaistuskustannusten kehittyminen ajan kuluessa.

5.4 Avotoimisto

5.4.1 Energiankulutus

Taulukko 6. Valaistusenergiankulutus avotoimistossa.

Valaistusvaihtoehto	1	2	3	4
Kokonaisenergia (kWh/a)	2104,42	1230,21	1738,44	1051,92
LENI (kWh/m ² /a)	25,26	14,77	20,87	12,63

Myös avotoimistossa perusratkaisun (vaihtoehto 1) energiankulutus oli selvästi suurin (25,26 kWh/m²/a) (Taulukko 6). Vaihtamalla valaistusratkaisu paikallistetusta yleisvalaistuksesta paikallis- ja yleisvalaistuksen yhdistelmään (vaihtoehto 3) energiaa säästyi 17% verrattuna perusratkaisuun. Ohjauksilla saavutettiin suurimmat energiansäästöt. Vaihtoehdon 2 energiankulutus oli 42% ja vaihtoehdon 4 50% pienempi kuin vaihtoehdon 1 energiankulutus. Avotoimistossa ohjauksilla ei saatu yhtä suuria energiansäästöjä kuin toimistohuoneessa. Tämä johtuu tilojen erilaisesta käytöstavasta.

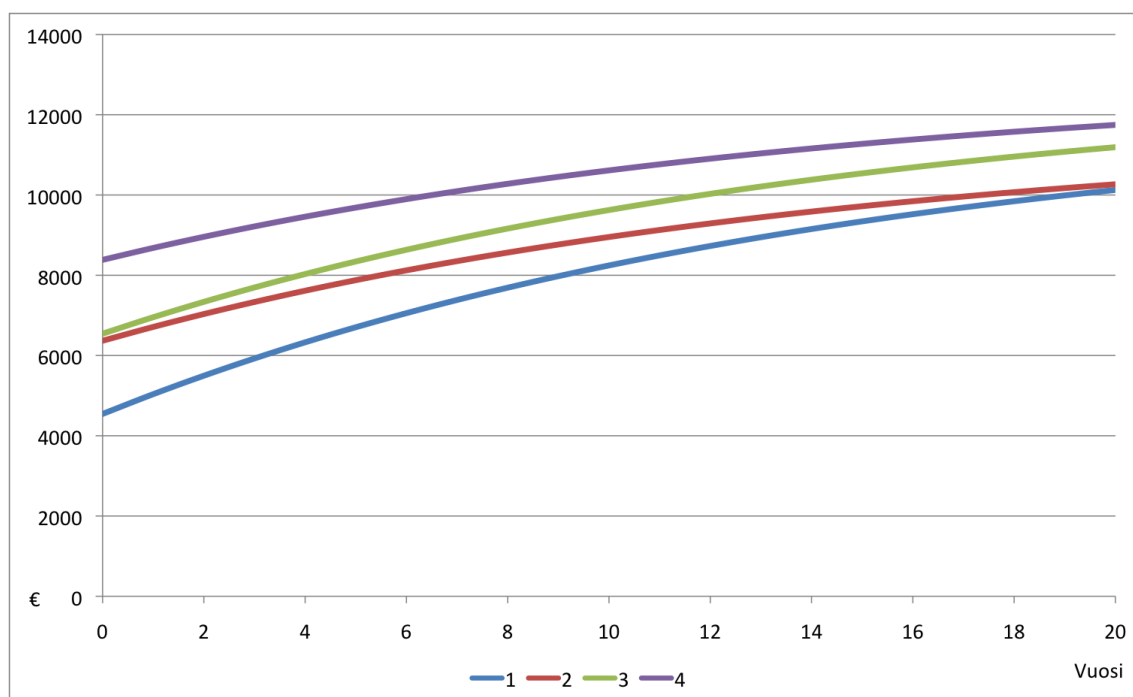
5.4.2 Elinkaarikustannukset

Avotoimiston valaistusvaihtoehtojen 1–4 elinkaarikustannusten nykyarvot on esitetty taulukossa 7. Elinkaarikustannuksia tarkasteltaessa edullisimmaksi vaihtoehdoksi osoittautui vaihtoehto 1 (10126 €). Vaihtoehto 2 oli 1,4%, vaihtoehto 3 10,5% ja vaihtoehto 4 16,0% kalliimpi kuin vaihtoehto 1. Vaihtoehdoissa, joissa ei ollut automaattista ohjausjärjestelmää (1 ja 3) voidaan havaita energian merkittävä osuus elinkaarikustannuksissa. Investointikustannuksen osuus oli kaikissa vaihtoehdoissa kuitenkin suurin. Huollon osuus kustannuksista oli kaikissa vaihtoehdoissa merkityksettömän pieni. Lamppu- ja liitäntälaittekustannusten pieni osuus (enintään 12% kokonaiskustannuksista) on selitettävissä laskelmissa käytetyllä pitkäikäisellä teknologialla ja vuosittaisilla käyttötunneilla.

Taulukko 7. Elinkaarikustannusten nykyarvot ja osuudet avotoimistossa.

Valaistusvaihtoehto	1		2		3		4	
Kustannuslaji	€	%	€	%	€	%	€	%
Investointi	4544	45%	6368	62%	6544	58%	8384	71%
Lamput ja liitäntälaitteet	1038	10%	1208	12%	879	8%	1049	9%
Huolto	85	1%	85	1%	85	1%	85	1%
Energia	4459	44%	2607	25%	3683	33%	2229	19%
Yhteensä	10126	100%	10267	100%	11191	100%	11746	100%

Avotoimiston valaistusvaihtoehtojen elinkaarikustannusten kehittyminen on esitetty kuvassa 26, josta voidaan havaita, että vaihtoehto 1 on edullisin vaihtoehto koko tarkastelujakson ajan, mutta vaihtoehto 2 lähenee sitä, mitä pidemmälle tarkastelua ulotetaan. Vaihtoehdot 3 ja 4 eivät näytä saavuttavan vaihtoehtoa 1 koskaan.



Kuva 26. Avotoimiston valaistuskustannusten kehittyminen ajan kuluessa.

5.5 Käytävä

5.5.1 Energiankulutus

Taulukko 8. Valaistusenergiankulutus käytävässä.

Valaistusvaihtoehto	1	2	3	4
Kokonaisenergia (kWh/a)	616,00	583,76	494,00	469,38
LENI (kWh/m ² /a)	10,27	9,73	8,23	7,82

Käytävässä perusratkaisu kulutti eniten energiaa (LENI 10,27 kWh/m²/a) (Taulukko 8). Käytävässä vaihtoehtojilla 2, 3 ja 4 ei saatu yhtä suuria energiansäästöjä kuin toimistohuoneessa ja avotoimistossa. Ottamalla liiketunnistinohjaus käyttöön perusratkaisussa (vaihtoehto 2) saavutettiin vain 5% energiansäästö. Vaihtamalla pienloistelamppuvalaisimet LED-valaisimiin (vaihtoehto 3) saavutettiin 20% energiansäästö verrattuna perusratkaisuun. Kun LED-valaistukseen lisättiin vielä liiketunnistinohjaus, energiaa kului 24% vähemmän kuin vaihtoehdossa 1.

5.5.2 Elinkaarikustannukset

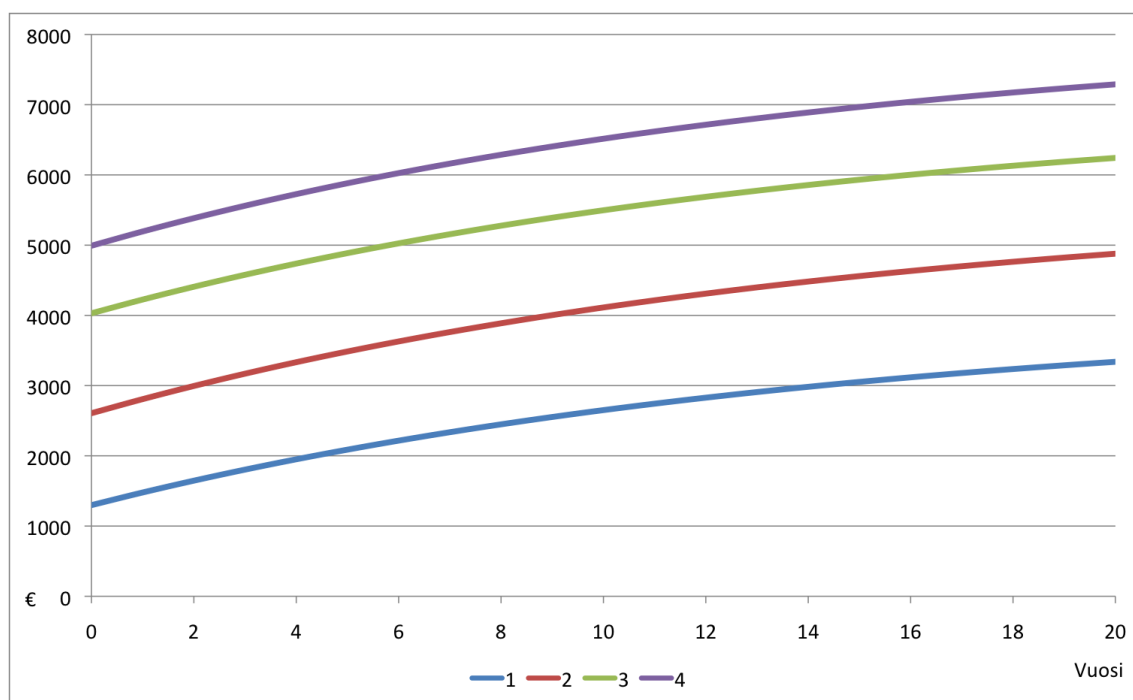
Käytävän valaistusvaihtoehtojen 1–4 elinkaarikustannusten nykyarvot on esitetty taulukossa 9. Elinkaarikustannuksia tarkasteltaessa edullisimmaksi vaihtoehdoksi osoittautui vaihtoehto 1 (3339 €). Vaihtoehto 2 oli 46,1%, vaihtoehto 3 87,0% ja vaihtoehto 4 118,3% kalliimpi kuin vaihtoehto 1. Vaihtoehdossa 1, jossa ei ollut automaattista ohjausjärjestelmää voidaan havaita energian merkittävä osuus elinkaarikustannuksissa. Investointikustannuksen osuus oli kaikissa vaihtoehdoissa kuitenkin suurin. Huollon osuus kustannuksista oli kaikissa vaihtoehdoissa merkityksettömän pieni. Lamppu- ja liitäntälaittekustannusten osuus oli käytävässä selvästi suurempi kuin toimistohuoneessa ja avotoimistossa. (17–20% kokonaiskustannuksista). Tämä selittyy sillä, että käytävän

pienen valaistusvoimakkuusvaatimuksen takia energiaa kuluu valaistukseen vähemmän kuin toimistotiloissa.

Taulukko 9. Elinkaarikustannusten nykyarvot ja osuudet käytävässä.

Valaistusvaihtoehto	1		2		3		4	
Kustannuslaji	€	%	€	%	€	%	€	%
Investointi	1298	39%	2607	53%	4030	65%	4992	68%
Lamput ja liitäntälaitteet	677	20%	976	20%	1097	18%	1235	17%
Huolto	58	2%	58	1%	69	1%	69	1%
Energia	1305	39%	1237	25%	1047	17%	995	14%
Yhteensä	3339	100%	4878	100%	6242	100%	7290	100%

Käytävän valaistusvaihtoehtojen elinkaarikustannusten kehittyminen on esitetty kuvassa 27, josta voidaan havaita, että vaihtoehto 1 on selvästi edullisin vaihtoehto koko tarkastelujakson ajan. Muut valaistusvaihtoehdot ovat selvästi kalliimpia ja niiden kustannustaso ei edes lähene vaihtoehtoa 1 tarkastelujaksoa pidemmälle katsottaessa. Vaihtoehto- ja 2, 3 ja 4 rasittaa niihin sitoutunut suuri alkuinvestointi verrattuna vaihtoehtoon 1.



Kuva 27. Käytävän valaistuskustannusten kehittyminen ajan kuluessa.

6 Johtopäätökset

Toimistotaloissa on erilaisia tiloja, jotka voidaan jakaa ryhmiin niiden käyttötarkoituksen ja työpistesijoittelun perusteella. Pohjoismaissa yleisin toimistotyyppi on yhdistelmätoimisto (combi-office). Suunnitteluvaiheessa tilojen jakaminen käyttötarkoituksen mukaan on hankalaa, sillä käytötapa ei useinkaan ole ennalta tiedossa.

Valaistuksen ohjaukseen on kehitetty useita eri järjestelmiä, joista monet ovat erittäin hyvin soveltuvia toimistovalaistukseen. Kullakin järjestelmällä voidaan toteuttaa monenlaisia ohjausstrategioita. Suurin energiansäästö saatavissa, kun käytetään ohjausstrategioita, joissa keinovalaistusta himmennetään työskentelyalueelle saapuvaan luonnonvaloon perustuen. Pelkällä läsnäoloon perustuvalla ohjauksella ei saavuteta läheskään yhtä merkittäviä energiansäästöjä kuin päivänvaloon perustuvilla ohjauksilla, etenkin tiloissa, joissa kuljetaan usein, esimerkiksi toimistojen käytävillä.

Tilan käytötapa vaikuttaa merkittävästi ohjauksilla saavutettaviin energiansäästömahdollisuuksiin. Toimistohuoneessa ja avotoimistossa ohjauksilla pystyi saavuttamaan suuremman energiansäästön kuin valaistustapaa ja -teknologiaa vaihtamalla. Toimistohuoneessa, jossa oli yksi työpiste, ohjauksilla saavutetut edut olivat merkittävämpiä kuin avotoimistossa, joissa oli useita työpisteitä. Tämä selittyy pitkälti läsnäolotunnistuksen parempaan tarkkuuteen toimistohuoneessa, jossa häiritseviä tekijöitä, kuten muiden työntekijöiden liikettä, on vähemmän. Sen sijaan käytävällä investointi LED-valaisimiin aiheutti suuremman energiansäästön kuin investointi ohjausjärjestelmään. LED-valaisimilla valaistun käytävän LENI-luku oli pienempi kuin pienloistelampuilla, vaikka LED-valaisimia tarvittiin enemmän vastaavan valaistusvoimakkuuden saamiseksi käyttötasolle.

Energian kulutuksen pienentyminen ei kuitenkaan näkynyt voimakkaasti elinkaarikustannusten nettohyötyarvoissa. Eniten elinkaarikustannuksiin vaikutti alkuinvestointiin kulunut pääoma. Vain toimistohuoneessa investointi perusratkaisua kalliimpiin vaihtoehtoihin näkyi pienempinä elinkaarikustannuksina. Toimistohuoneenkin tapauksessa kalliimmat investoinnit alkoivat tuottaa voittoa verrattuna perusratkaisuun vasta noin 15 vuoden kuluttua. Huoltokustannukset olivat pieniä ja niiden suhteellinen osuus elinkaarikustannuksista oli lähes merkityksetön. Vertailulaskelmiin niitä ei siis ole välttämätöntä sisällyttää toimistovalaistusasennuksia tarkasteltaessa. Käytettäessä pitkäikäistä lamppu- ja liitäntälaiteteknologiaa ja vertailtaessa eri toimistovalaistusratkaisuja voidaan havaita, että lamppu- ja liitäntälaitetekustannusten osuus on noin 10% elinkaarikustannusten nykyarvosta. Vaihtoehtojen välillä ei ole merkittäviä eroja lamppu- ja liitäntälaitetekustannuksissa.

Tässä työssä saatujen tulosten perusteella voidaan todeta, että hyvähyötysuhteisen loistelamppuvalaisimen, jossa on pitkäikäiset lamput, yhdessä paikallistetun yleisvalaistustavan kanssa on jo varsin energiatehokas valaistusratkaisu. Ohjausratkaisuihin pitäisi yrittää löytää nykyistä vielä helpommin ja nopeammin asennettavia ja kustannustehokkaita vaihtoehtoja, jotta alkuinvestoinnit pienenisivät. Erityisesti ohjausjärjestelmien helppoon käyttöönottoon tulisi panostaa. Tässä työssä selvitettiin paikallisten ja integroitujen ohjausratkaisujen vaikutusta energiatehokkuuteen. Laajoilla koko rakennuksen käsittävillä ohjausjärjestelmillä voidaan saada muitakin hyötyjä kuin vain energiansäästöä. Niillä voidaan tuottaa tietoa kiinteistönhoidon tarpeisiin, todeta energiatodistusten vaatimusten täyttyminen ja tehdä joustavasti hienosäätöjä valaistusohjausten toimintaan.

Jossain tilanteissa valaistusohjausjärjestelmillä voidaan tehdä muutoksia toimintaan ja ryhmittelyyn ilman kaapelointimuutoksia, jos esimerkiksi rakennuksessa tehdään tilamuutoksia.

Valaistuksen energiankulutusta voidaan nykyisellä teknologiallakin vielä edelleen selvästi pienentää valaistusvoimakkuudesta ja sen tasaisuudesta tinkimättä. Energian säästöön investoimiseen pitää olla vain motivoivia tekijöitä. Tässä työssä ei löydetty sellaisia kustannussäästöjä, jotka motivoisivat investoimaan sinänsä jo varsin energiantehokasta ratkaisua vielä tehokkaampiin vaihtoehtoihin. Tilanne kuitenkin muuttuu jatkuvasti ja erityisesti LED-teknologian nopea kehittyminen sekä toisaalta hintojen aleneminen vaikuttanee ratkaisevasti tulevaisuuden valaistusratkaisuihin. Jos sähköenergian hinta edelleen kallistuu tulevaisuudessa ja toisaalta korot pysyvät pieninä, investointi kalliimpiin ja vähemmän energiaa kuluttaviin vaihtoehtoihin voi tulla entistä kiinnostavammaksi.

Lähteet

- Aalto 2010. Valaistuskustannukset. Kurssin S-118.3260 Valaistus suunnittelu luentomoniste. Aalto-yliopisto. Sähkötekniikan korkeakoulu. Valaistussyksikkö. 13 s.
- Ahtila, P. 2009. Energiatohokkuuden avainosaamiset 2030 (online). Teknillinen korkeakoulu. Energia-tekniikan laitos. Viitattu: 26.2.2011.
www.videonet.fi/tekes/climbus2009/21/Ahtila%20climbus_100609.pdf.
- Bolton W. 2008. Control and Instrumentation Systems. Teoksessa: Maxfield, C., Bird, J., Laughton, M. A., Bolton, W., Leven, A., Schmitt, R., Sueker, K., Williams, T., Tooley, M., Moura, L., Darwazeh, I., Kester, W., Bensky, A. & Warne, D. F. Electrical Engineering - Know it All. 1. painos. Oxford: Elsevier. s. 737-746. ISBN: 978-1-85617-528-9.
- Boyce, P. R., Eklund, N. H. & Simpson, S. N. 2000. Individual Lighting Control: Task Performance, Mood and Illuminance. Journal of the Illuminating Engineering Society. 29(1): 131-142.
- Carter, D., Slater, A. & Moore, T. 1999. A Study of Occupier Controlled Lighting Systems. Proceedings of the 24th Session of the CIE. Varsova. 1(2): 108-110.
- Cooper Lighting and Security 2006. Lighting Solutions. 480 s.
- Dynalite 2009a. An Introduction to the Dynalite Control System (online). Viitattu: 5.8.2010.
http://www.dynalite.eu/v2/dynalite/img.jsp?id=1086000&col=upload_file.
- Dynalite 2009b. Technical guide. Control principles (online). Viitattu: 5.8.2010.
http://www.dynalite.eu/v2/dynalite/img.jsp?id=1085998&col=upload_file.
- EIA 2005. Definition of Energy Efficiency (online). Viitattu: 26.2.2011.
www.eia.doe.gov/emeu/efficiency/definition.htm.
- EMV 2010. Energianmarkkinaviraston sähkön hintavertailu (online). <http://www.sahkonhinta.fi>. Viitattu: 20.2.2011.
- Gynther, L., Halme, K., Laitila, P., Lehenkari, J. & Lievonen, J. 2008. Energiatohokkuus ja parhaat käytännöt: Tietopohjan ja tarpeiden kartoitus. Sektoritutkimuksen neuvottelukunta. Kestävä kehitys 3-2008. 37 s. ISSN: 1797-7673.
- Helvar 2007. Digidim reititinjärjestelmä (online). <http://www.helvar.fi>. Viitattu: 20.2.2011.
- Hornby, A. S. 2000. Oxford Advanced Learner's Dictionary of Current English. 6. painos. Oxford: Oxford University Press. 1539 s. ISBN: 0-19431-510-X.
- IESNA 2000. The IESNA Lighting Handbook. 9. painos. Rea, M. S. (päätoim.). New York: The Illumination Engineering Society of North America. 1037 s. ISBN: 0-87995-150-8.
- Jennings, J. D., Rubinstein, F. M., DiBartolomeo, D. & Blanc, S. L. 2000. Comparison of Control Options in Private Offices in an Advanced Controls Testbed. Journal of the Illuminating Engineering Society. 29(2): 39-60.
- Licht.de 2008. Licht.wissen 01. Lighting with Artificial Light (online). www.licht.de/fileadmin/shop-downloads/h01_engl.pdf. Viitattu: 20.2.2011.
- Lorentz, D. 2002. Büro nach Mass, aktuelle Büroformen im Vergleich. Teoksessa: Knirsch, J. Büroräume. Bürohäuser. 2. painos. s. 58-70. Leinfelden-Echterdingen: Verlagsanstalt Koch. ISBN: 3874226433.
- Maniccia, D., Rutledge, B., Rea, M. S. & Morrow, W. 1999. Occupant Use of Manual Lighting Controls in Private Offices. Journal of the Illuminating Engineering Society. 28(2): 42-56.
- Moore, T., Carter, D. J. & Slater, A. I. 2002. User Attitudes Toward Occupant Controlled Office Lighting. Lighting Research and Technology. 34(3): 207-219.

- Pigg, S., Etlers, M. & Reed, J. 1996. Behavioral Aspects of Lighting and Occupancy sensors in Private Offices: A Case Study of a University Office Building. Teoksessa: Proceedings of ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings. Pacific Grove. s. 8.161-8.170.
- SFS-EN 12464-1 2003. Valo ja valaistus. Työkohteiden valaistus. Osa 1: Sisätilojen työkohteiden valaistus. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS. 35 s.
- SFS-EN 12665 2009. Valo ja valaistus. Perustermi ja kriteerit valaistusvaatimusten määrittämiseksi. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS. 37 s.
- SFS-EN 15193 2009. Rakennusten energiatehokkuus. Valaistuksen energiatehokkuus. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS. 134 s.
- SFS-EN 1838 1999. Valaistussovellukset. Turvavalistus. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS. 14 s.
- SFS-IEC 60050-351 2008. Sähkötekniikan sanasto. Osa 351: Ohjaustekniikka. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS. 137 s.
- SFS-IEC 60050-826 2005. Sähkötekniikan sanasto. Osa 826: Rakennusten sähköasennukset. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS. 77 s.
- Simpson, R. S. 2003. Lighting Control – Technology and Applications. 1. painos. Oxford: Elsevier. 575 s. ISBN: 0-240-51566-8.
- SVS 1986. Valaistussuosituksia. Sisävalaistus. Suomen Valoteknillinen Seura ry:n julkaisuja 9-1986. Helsinki: Sähköurakoitsijaliiton Koulutus ja Kustannus Oy. 166 s. ISBN: 951-95444-8-8.
- SVS 2008. Valaistushankintojen energiatehokkuus. Taustaraportti. Versio 4.0 (online). Viitattu: 26.2.2011. www.valosto.com/tiedostot/SVS_Valaistushankintojen_energiatehokkuus_V4.pdf.
- TEM 2009. Energiatehokkuus (online). Viitattu: 26.2.2011. www.tem.fi/index.php?s=2586.
- Tetri, E. 2001. Effect of Dimming and Cathode Heating on Lamp Life of Fluorescent Lamps. Espoo: Helsinki University of Technology. Report 28. 40 s. ISBN 951-22-5709-2.
- TridonicAtco 2005. WinDIM@net. Innovative Lighting Management (online). Viitattu: 26.2.2011. www.tridonicatco.com/kms/media/uploads/241388231_windimnet_englisch_copy3.pdf.
- TridonicAtco 2009a. Data sheet 02/09-789-1. PCA T5 EXCEL one4all lp x!tec (online). Viitattu: 26.2.2011. www.tridonicatco.com/kms/media/uploads/pca_t5_excel_one4all_lp_xitec_en.pdf.
- TridonicAtco 2009b. Commissioning Instructions. Corridorfunction (online). Viitattu: 26.2.2011. www.tridonicatco.com/kms/media/uploads/commissioning_instructions_corridorfunction_en.pdf.
- TridonicAtco 2009c. Data sheet 04/09-832-0. Powercontrol PCIS outdoor DIM B011 (online). Viitattu: 26.2.2011. www.tridonicatco.com/kms/media/uploads/pcis_outdoor_dim_b011_en.pdf.
- Van Meel, J. 2001. The European Office. Office design and national context. 182 p. 2nd edition. Rotterdam: 010 Publishers.
- Vehmas, J. 2005. Energiatehokkuuden yhteiskunnalliset merkitykset (online). Turun kauppakorkeakoulu. Tulevaisuuden tutkimuskeskus. Viitattu: 26.2.2011. www.teollinenekologia.fi/pdf/Tre05/Vehmas_19042005.pdf.
- Watt Stopper. 2010. Designing a Lighting Control System (online). Viitattu: 20.10.2010. <http://www.wattstopper.com/getdoc/415/binderappintro0904.pdf>.
- ZVEI 2005. ZVEI Guide to DIN EN 12464-1. Frankfurt: Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie. 25 s.